75 JAAR

1920 1995

NERG 1920 1995

jubileumnummer

tijdschrift van het

nederlands elektronica- en radiogenootschap

deel 60 nr.2 1995

nederlands elektronica- en radiogenootschap

Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap
Correspondentie-adres: Postbus 39, 2260 AA Leidschendam.
Gironummer 94746 t.n.v. Penningmeester NERG, Leidschendam.

HET GENOOTSCHAP

Het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap (NERG) is een wetenschappelijke vereniging, gericht op elektronica, telecommunicatie en informatieverwerking.
Het doel van het NERG is om het wetenschappelijk onderzoek op deze gebieden te bevorderen en de verbreiding en toepassing van de verworven kennis te stimuleren.

BESTUUR

LIDMAATSCHAP

Voor lidmaatschap wende men zich via het correspondentie-adres tot de secretaris. Het lidmaatschap van het NERG staat open voor academisch gegradueerden en anderen die door hun kennis en ervaring bij kunnen dragen aan het genootschap. De jaarlijkse contributie bedraagt ingaande 1996 voor gewone leden *f* 75,- en voor junior leden *f* 39,-. Bij automatische incasso wordt *f* 3,- korting verleend.
Gevorderde 1e fase studenten en 2e fase studenten komen in aanmerking voor het junior lidmaatschap en kunnen daartoe contact opnemen met de contactpersoon op hun universiteit.
In bepaalde gevallen kunnen ook andere leden, na overleg met de penningmeester, voor een gereduceerde contributie in aanmerking komen.
De contributie is inclusief abonnement op het Tijdschrift van het NERG en deelname aan vergaderingen, lezingen en excursies.

HET TIJDSCHRIFT

Het tijdschrift verschijnt gemiddeld vijf maal per jaar. Opgenomen worden artikelen op het gebied van de elektronica en de telecommunicatie. Auteurs, die publicatie van hun onderzoek in het tijdschrift overwegen , wordt verzocht vroegtijdig contact op te nemen met de hoofdredacteur of een lid van de redactiecommissie.

REDACTIECOMMISSIE

ISSN 03743853

75 JAAR NERG, TOEN EN NU

prof.ir. J.H. Geels
voorzitter NERG



Summary
Seventy-five years ago, on the 29th of May 1920, the 'Nederlands Radiogenootschap' (N.R.G.) was founded as a scientific association, with as dedication the promotion of science and technology in the domain of radio and related fields. The initiative was taken by three gentlemen. At the end of 1920 the N.R.G. counted 42 members.
As to understand the motivation of the initiators and the first members, a retrospective sketch is presented of the circumstances in which the establishment of the N.R.G. was embedded.
An introspective view of the profile of the NERG is presented and a description of the way the association serves its members.

HET N.R.G. VAN TOEN

Terug naar de wortels

Herdenken gebeurt momenteel alle dagen. Het is immers vijftig jaar geleden dat ons land en de overzeese gebiedsdelen volledig werden bevrijd van hun bezetters. Het jaar 1945 werd een keerpunt in de geschiedenis: de tweede wereldoorlog was afgelopen en de wederopbouw kon beginnen. Wie het zelf heeft meegemaakt herinnert het zich nog levendig. In de terugblikkende media kon men dezer dagen kennisnemen van de voorbeeldige bereidheid van vrijwel alle burgers om in het begin van de naoorlogse periode gezamenlijk de schouders te zetten onder het herstel van de maatschappij en de infrastructuur van ons land. Synergie noemen we dat tegenwoordig. Later nam de entropie uiteraard weer toe.

Alhoewel ons land in de eerste wereldoorlog neutraal kon blijven en dus niet echt bij de oorlogsvoering was betrokken, was deze toch van invloed op het dagelijks leven van de burgers. Krachten werden gebundeld om de moeilijkheden het hoofd te bieden. Voor me ligt een stapel jubileumboeken en -uitgaven, die getuigen van het gunstig aspect voor de oprichting van organisaties in die tijd. De huidige generatie kan zich indenken dat ook de in 1918 begonnen naoorlogse periode werd gekenmerkt door de sterke wens om nieuwe mogelijkheden en kansen te benutten voor het inrichten van de samenleving.

Op 29 mei 1920 werd in die sfeer het 'Nederlands Radio Genootschap' (N.R.G.) opgericht met als doel de radio-wetenschap in Nederland en de Overzeese Gebiedsdelen te bevorderen. Onder 'radio-wetenschap' werd verstaan: de zuivere en toegepaste wetenschap van het gebied, dat al of niet rechtstreeks met radio-techniek verband houdt.

Wat ging daaraan vooraf? Om de motivatie van de oprichters en de eerste leden te begrijpen, kan een beknopte schets van de vroege geschiedenis[1] van de radiotelegrafie en elektronica als historische inbedding van de oprichting van het N.R.G. behulpzaam zijn.

De vroege radiogeschiedenis

In 1840 wist Joseph Henry in de Verenigde Staten hoogfrequent trillingen op te wekken, die op enige afstand zonder het gebruik van draad konden worden gedetecteerd.

In 1872 werd in de Verenigde Staten het eerste octrooi op het gebied van draadloze telegrafie verleend aan M. Loomis.

In 1873 kwam Maxwell met zijn beroemde mathematische theorie waarmee de elektromagnetische straling kon worden voorspeld, die Henry tevoren al empirisch had aangetoond. In 1887 verifieerde Hertz met zijn experimenten de theorie van Maxwell.

In 1875 maakte E. Thomson in de Verenigde Staten de eerste radio-apparaten, dus nog voor Hertz en Marconi.

In 1891 werd in de Verenigde Staten het eerste radio-octrooi verleend aan Edison.

Tijdens een voordracht voor de Royal Society ter nagedachtenis van Hertz demonstreerde Sir Oliver Lodge in 1894 een draadloze zender en ontvanger. Deze lezing trok alom de aandacht en stimuleerde veel onderzoekers in andere landen. Daaronder waren ook Marconi in Italië en Popov in Rusland, die elk van verschillende zijde als de 'uitvinder van de radio'[2] worden aangemerkt. In 1898 introduceerde Lodge een afsteminrichting voor draadloze telegrafie.

Tussen 1885 en 1892 ontwikkelde Edouard Branly in Frankrijk een metaalpoederdetector (coherer), die was gebaseerd op het reeds door Munk in 1835 ontdekte verschijnsel van samenkleving bij hoogfrequent stroomdoorgang.

In 1895 gebruikte Popov de metaalpoederdetector om onweersontladingen te registreren en hij inspireerde anderen om deze te gebruiken voor draadloze telegrafie.

Marconi begon zijn befaamde experimenten in 1895. In 1896 ontving hij zijn eerste Britse en Amerikaanse octrooien voor draadloze telegrafie. Nadat hij had aangetoond dat hij kon zenden en ontvangen over een afstand van een mijl, ging hij naar Engeland en vestigde daar in 1897 de 'Wireless Telegraph and Signal Company'.
Gebruikmakende van straalzenders met parabolische spiegels maakte Marconi in 1897 verbinding over 7 km in de haven van Brescia en later over 15 km over het Kanaal van Bristol. In 1898 ging hij over tot rondstralende antennes, waarmee hij verbinding maakte over 14 mijl op het eiland Wight.

In 1899 zond Marconi als eerste boodschappen van Folkstone over Het Kanaal naar Boulogne (32 mijl) en in 1901 over de Atlantische Oceaan tussen Poldhu (Engeland) en Saint Johns (Newfoundland).

In 1898 introduceerde Braun in Duitsland verbeterde koppelkringen, waarmee nauwkeuriger afstemming werd verkregen en interferentie tussen stations werd vermeden. In 1901 kwam hij met de kristaldetector. Braun's werk werd van zo'n groot belang geacht, dat hij de hem toegekende Nobel-prijs voor Natuurkunde gelijk moest delen met Marconi.

In 1900 ontwikkelde Slaby een afsteminrichting voor draadloze telegrafie.

In 1906 verbeterde Wien door vonkdoving het rendement van de vonkzender.

Rond 1907 lukte het Poulsen om met een boogzender hoogfrequente golven op te wekken.

In 1916 ontwikkelde Alexanderson een meervoudig afgestemde antenne.

In 1919 onderging de radio een revolutie door de zendbuis van Alexanderson.

In 1919 stelde H.H.S.D. Steringa Idzerda in Den Haag als eerste in Europa een omroepzender in dienst.

De vroege elektronicageschiedenis

In 1906 construeerde Alexanderson met magneetkernen voor frequentievermenigvuldiging de eerste van zijn hoogfrequentoscillatoren (een soort parametrische versterker), die een flinke stap vooruit betekenden in de radiotechniek. Ongeveer gelijktijdig waren in Duitsland Goldschmidt en von Arco daarmee bezig.

In 1906 waren ook de elektronenbuizen in opkomst: Lee de Forest en von Lieben vonden hun versterkerbuizen uit. Lee de Forest kreeg in 1907 octrooi op zijn versterkerbuis waarin een rooster tussen de kathode en anode is geplaatst (nog niet 'triode', doch 'audion' genoemd).

Het audion vond al spoedig ruime toepassing als detector in de radiotelegrafie. Voor die tijd waren als detectiemethoden gebruikt:
- de metaalpoederdetector van Branly (1892);
- de door R.A. Fessenden in 1902 ontwikkelde elektrolytische detector;
- de door Braun in 1901 ontwikkelde kristaldetector;
- de door Sir John A. Fleming op het Edison-effect in 1904 uitgevonden gebaseerde vacuumbuisdetector.

In 1909 vond L.H. Baekeland in België het bakeliet uit dat meteen werd toegepast bij de produktie van elektronische componenten.

In 1911 ontwikkelde O. von Bronk een hoogfrequentversterker.

In 1913 gebruikte A. Meissner in Duitsland het audion als generator van elektrische trillingen met teruggekoppelde elektronenbuizen.

In 1913 introduceerde E.H. Armstrong een zendbuis met drie elektroden, waarmee de radio-omroep mogelijk werd.

In 1915 kwam de hoogspanningsgelijkrichterbuis van I. Dushman, bekend als genetron, beschikbaar.

In 1916 werd door Armstrong voor ontvangtoestellen de superheterodyneschakeling ontworpen.

De oprichting

Uit het voorgaande blijkt dat in de eerste decennia van deze eeuw grote vooruitgang was geboekt bij de ontwikkeling van de radio en elektronica. Rond 1920 maakte de stand van de techniek de doorbraak mogelijk van allerlei toepassingen van de radiotelegrafie en de radio-omroep. Deze spraken tot de verbeelding en bezaten veel aantrekkingskracht.

Het initiatief tot oprichting[3] van het Nederlands Radiogenootschap werd in 1920 genomen door de heren A. Dubois, Dr. Balth. van der Pol en Ir. P.J.H.A. Nordlohne. Zij zagen dat inmiddels een vrij groot aantal ingenieurs en fysici bezig waren met het onderzoek en de praktijk van de radiotelegrafie. Zij meenden derhalve dat een vereniging met als doel de wetenschappelijke beoefening der radiotechniek reden van bestaan had. In een circulaire vroegen ze steun voor dit idee bij degenen die de radiotelegrafie als dagelijks werk beoefenden en bij een aantal hoogleraren van de Technische Hogeschool en de Universiteiten.

Het idee sloeg aan. Tijdens een vergadering op 29 mei 1920 in de Industriële Club te Amsterdam werd besloten tot oprichting van het Nederlands Radiogenootschap. We kunnen ons nauwelijks voorstellen hoe plechtig dat is verlopen, denkend aan de door deftigheid gekenmerkte tijdgeest en de bij notabelen passende donkere gestreepte driedelige costuums en overhemden met gesteven manchetten en losse, liggende of staande boorden. De drie initiatiefnemers werden gekozen in het eerste, vijf leden tellende bestuur.

Eind 1920 waren er 42 leden en 3 donateurs. Reeds in het eerste jaar werd besloten tot het uitgeven van het Tijdschrift met het bestuurslid H. Wesselius als redacteur. Spoedig volgde de aansluiting van ons land bij de Union Radio Scientific Internationale (URSI), die ook in 1920 werd opgericht.

De eerste voorzitter was prof.dr.jhr. G.J. Elias van 1920 tot 1927, die met zijn kennis en bekwaamheid de richting van de werkzaamheden van ons genootschap in hoge mate bepaalde. Dr. Balth. van der Pol, de eerste vice-voorzitter, werd de tweede voorzitter van 1927 tot 1931. Hij werd in de jaren van economische crisis opgevolgd door prof.ir. C.L. van der Bilt. Ir. A. Dubois werd in 1940 de voorzitter van het bestuur dat ons genootschap beleidvol met sterk verminderde activiteit door de moeilijke oorlogsjaren heeft moeten voeren.

Van begin af aan stonden de voordrachten en publikaties op een wetenschappelijk zeer hoog peil. Reeds in de oude jaargangen van Het Tijdschrift staan artikelen die internationaal als belangrijke bijdragen tot de radiotechniek zijn erkend. Het N.R.G. maakte zijn doelstelling waar en ontwikkelde zich tot een vereniging met prestige in de wetenschappelijke wereld.

Tenslotte dient nog te worden vermeld dat het werkterrein van ons genootschap in de loop der tijd breder werd, vooral als gevolg van de steeds ruimere toepassingsmogelijkheden van de elektronica bij de overdracht van signalen en de behandeling van informatie, alsook de besturing en automatisering van deze processen. De behoefte werd gevoeld om dit in de naam van ons genootschap tot uitdrukking te brengen. In 1961 besloot de algemene vergadering daarom de naam te wijzigen in 'Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap'[4].

HET NERG VAN NU

Het huidige profiel

Ons genootschap presenteert zich nu als een wetenschappelijke vereniging, gericht op de elektronica en de transmissie en verwerking van informatie. De opdracht is nog steeds: het bevorderen van het wetenschappelijk onderzoek op deze gebieden en het stimuleren van de verbreiding en toepassing van de verworven kennis.

Bevorderen en stimuleren zijn werkwoorden, die door het bestuur in samenspraak met de leden moeten worden vertaald in activiteiten. De beproefde middelen daarvoor zijn nog onveranderd: enerzijds de eigen werkvergaderingen, excursies en publikaties en anderzijds het deelnemen in of scheppen van voorwaarden voor activiteiten van andere organisaties of personen.

De werkvergaderingen

In de afgelopen jaren organiseerde het NERG jaarlijks een tiental werkvergaderingen, een aantal daarvan in samenwerking met andere wetenschappelijke en professionele organisaties (zoals de Benelux-sectie van IEEE). Deze kunnen een hele dag, middag of avond duren en worden verspreid over het land gehouden. Ze bestaan voornamelijk uit voordrachten, waarbij demonstraties en excursies kunnen voorkomen. Een werkvergadering is als regel gewijd aan een specifiek onderwerp dat voldoende aanleiding geeft om onder de aandacht van de leden te worden gebracht. Dit kan o.m. de rapportering van de resultaten van een wetenschappelijk onderzoek zijn of de presentatie van een voorgenomen of lopend onderzoeksproject. Maar ook toepassingsaspecten, zoals een fabricageproces, een bijzondere installatie of implementatie, de introductie in de markt van een innoverend systeem, enz. kunnen een goede aanleiding vormen.

Zoals gebruikelijk gebeurt dit vooral door voordrachten met een bij het thema passend abstractiestratum of door inleidingen met een goed 'tutorial' niveau. De totstandbrenging van een programma met jaarlijks tien à twaalf evenementen van hoge kwaliteit vormt de grootste uitdaging.

De leden bezoeken de werkvergaderingen met sterk verschillende instelling en verwachting. Het is voor het bestuur een uitdaging om het schijnbaar onverenigbare te verenigen en ieder tevreden te stellen. Toch blijkt dit beter mogelijk te zijn dan het lijkt.
Wie werkzaam is op het gebied van het onderwerp, komt om zijn kennis en inzicht door luisteren en discussie te toetsen of verdiepen en wil vaak ook persoonlijke contacten maken.
Anderen komen om kennis te nemen van de onderzoeksvragen die buiten hun aandachtsgebied spelen en om te leren van de daarbij gebruikte methoden en gevonden oplossingen, hetwelk voor hun eigen werk inspirerend kan zijn.
Weer anderen zijn de post-actieven die de werkvergaderingen aangrijpen als middel om globaal op de hoogte te blijven van de ontwikkelingen in het vakgebied en als een goede gelegenheid om hun oude collega's te blijven ontmoeten.
De junioren - dat zijn de in hun studie gevorderde studenten en de jonge ingenieurs die voor voortgezette studie of onderzoek aan de universiteit verbonden blijven - hebben hun eigen verwachtingspatroon, hetgeen het wenselijk maakt om van tijd tot tijd speciaal op hen gerichte werkvergaderingen te organiseren.

Voor de werkvergaderingen wordt dankbaar gebruikt gemaakt van beschikbare ruimte, die als regel welwillend door gastvrije universiteiten, laboratoria en bedrijven in het belang van de wetenschappelijke cultuur in ons vakgebied wordt aangeboden.

Het Tijdschrift van het NERG

Vanaf de oprichting heeft ons genootschap een tijdschrift uitgegeven. In de afgelopen jaren zijn er vijf afleveringen per jaar verschenen, met als laatste nummer van de jaargang een compilatie van de in ons vakgebied bij de technische universiteiten verdedigde proefschriften. Om de kosten laag te houden is de uitvoering eenvoudig.

De inhoud bestaat voor het merendeel uit artikelen naar aanleiding van de voordrachten op werkvergaderingen en excursies. Ook door leden en anderen spontaan aangeboden artikelen van goed niveau zijn welkom.

Onderwijs

Het NERG stimuleert het academisch en post-academisch onderwijs op zijn vakgebied en neemt daartoe deel aan overleg tussen de Technische Universiteiten.

De Onderwijscommissie van het NERG draagt momenteel bij aan de totstandkoming en het kwaliteitsbeheer van nieuwe middelbare beroepsopleidingen op gebieden zoals telematica en informatietechniek.

Het NERG heeft ook een rijke onderwijstraditie in het beroepsonderwijs. In de tijd dat de overheid zich nog niet belastte met de zorg voor onderwijs op het gebied van radio en elektronica, heeft ons genootschap - indien daartoe uitgenodigd - toezicht uitgeoefend op een aantal particuliere opleidingen. Zodoende kon in beleidsmatige zin een directe invloed uitgeoefend worden op de inhoud van de cursussen.
Met het gesubsidieerde onderwijs ging het sinds de zeventiger jaren beter, waardoor de behoefte aan particuliere opleidingen inmiddels grotendeels is verdwenen. Bij enkele overgebleven instituten levert de Onderwijscommissie van het NERG nog steeds gecommitteerden voor toezicht op de examens.

In 1937 begon het N.R.G. examens af te nemen voor het eigen diploma van radio (later elektronica) monteur en technicus. Ons genootschap heeft met deze omvangrijke taak duidelijk richting kunnen geven aan de opleiding van goed geschoold personeel in ons land en heeft zodoende een wezenlijke bijdrage geleverd aan de ontplooiing van de sterk groeiende elektronische industrie.
Naarmate het gesubsidieerd onderwijs beter werd, daalde uiteraard de belangstelling voor de NERG-diploma's. De afnemende examenactiviteiten zijn rond 1980 overgedragen aan de Vereniging Elektrotechnisch Vakonderwijs (VEV) te Nijkerk.

Te zamen met de V.E.V. had het N.R.G. in 1957 de Stichting tot Verbetering van het Vakonderwijs op het gebied van de Elektronica in Nederland (S.V.E.N.) opgericht. Het rapport van het eerste SVEN-onderzoek over de toestand van het elektronica-onderwijs, gericht aan de Minister van Onderwijs en gepubliceerd in brede kring, trok heel wat belangstelling en maakte veel los. Uit giften van het bedrijfsleven en de overheid werd een fonds gevormd, waarmee de nodige apparatuur voor de opleidingen werd aangeschaft. Met deskundig advies en met beschikbaarstelling van materiële middelen werd op doelmatige wijze en met bevredigend resultaat het particuliere en gesubsidieerde onderwijs gesteund.

In latere jaren heeft de SVEN veel bijgedragen aan onderwijsvernieuwing door te rapporteren en (ongevraagd) te adviseren over de kloof tussen de actuele inhoud van het beroepsonderwijs op het gebied van de elektronica en de in de praktijk gestelde redelijke eisen van vakbekwaamheid qua kennis en vaardigheden.

Sinds enkele jaren zijn er wettelijk voorgeschreven commissies ingesteld voor het overleg tussen het onderwijsveld en het bedrijfsleven (COB's). Daarvan wordt veel heil verwacht voor de voortdurende afstemming en vernieuwing van de inhoud van het beroepsonderwijs.

De SVEN zag door de nieuwe adviesstructuur haar rol als adviseur op beleidsgebied uitgespeeld. Er bleef nog slechts ruimte over voor incidentele stimulerende acties van bescheiden omvang. Derhalve wijzigde de SVEN in overleg met de VEV en het NERG in 1992 de statuten, waardoor het bestuur van het fonds werd ondergebracht bij ons genootschap met de opdracht het te beheren overeenkomstig de SVEN-doelstellingen, hetgeen door het NERG werd aanvaard.

Financiële ondersteuning

Ons genootschap beheert een fonds 'Bijzondere Activiteiten' waarmee financiële ondersteuning kan worden geboden aan allerlei, in de doelstellingen van het NERG passende activiteiten. Zo zijn er subsidies en garantievoorschotten verstrekt voor symposia en conferenties in Nederland. Ons genootschap loopt daarbij het risico zijn garantievoorschot geheel of ten dele te verliezen, doch heeft daartegenover ook recht op een eerlijk aandeel in een eventueel gunstig financieel resultaat. Deze bijzondere baten dienen als reserve voor tegenvallers, ter bekostiging van meer dienstverlening aan de leden en als bron voor de financiële ondersteuning van studenten.

De elektrotechnische studieverenigingen van de Technische Universiteiten ontvangen regelmatig subsidies voor jaarboeken en studiereizen.

Studenten (1e en 2e fase) kunnen van de penningmeester een tegemoetkoming ontvangen in de kosten van het bezoek van onze werkvergaderingen.

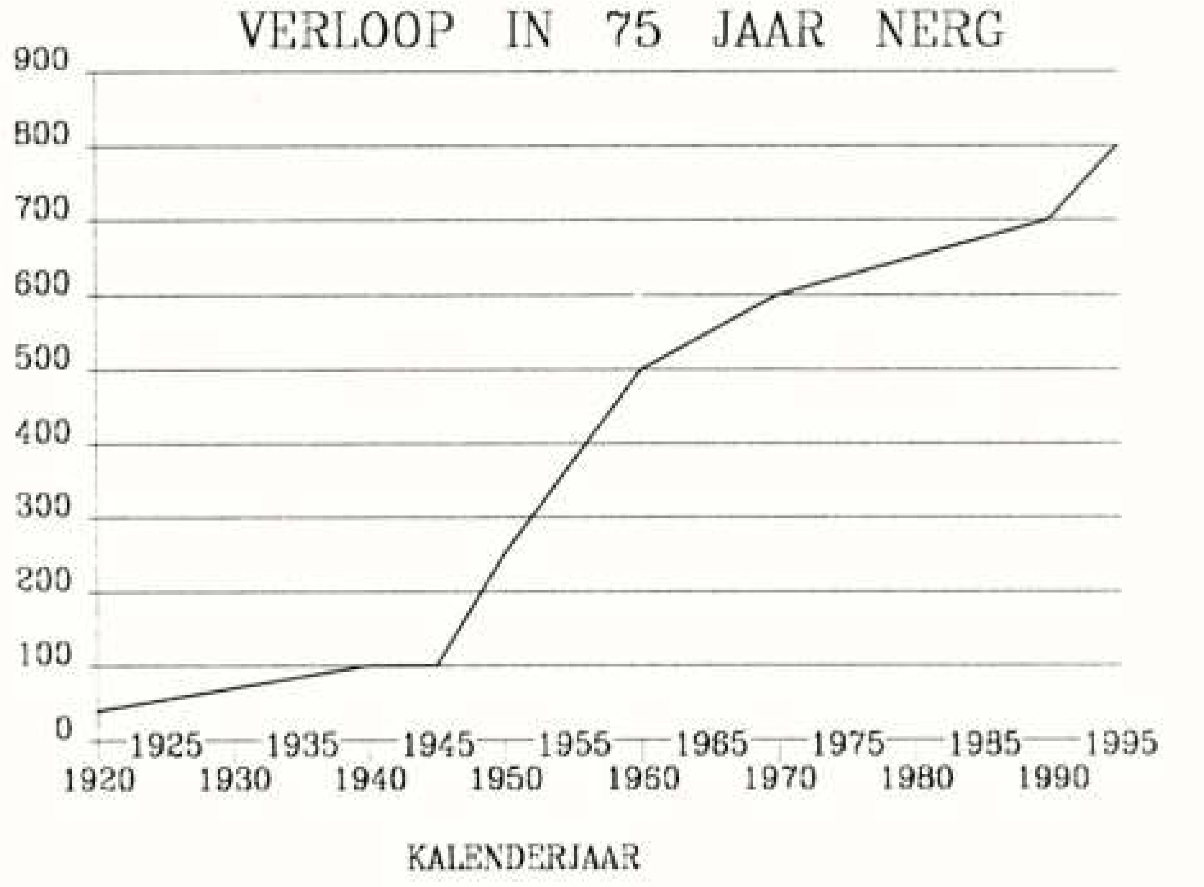
Lidmaatschap

In de statuten is bepaald dat het gewone lidmaatschap van het NERG open staat voor academici en anderen wier kennis en ervaring een vruchtbaar lidmaatschap mogelijk maken. Het NERG kan ook het erelidmaatschap verlenen op grond van buitengewone verdiensten voor ons genootschap of voor het doel daarvan. Er zijn thans nog negen ereleden in leven.

Het junior-lidmaatschap staat open voor studenten (en jonge ingenieurs die een 2e fase studie volgen) aan een Nederlandse instelling van wetenschappelijk onderwijs in een studierichting die verband houdt met het vakgebied van het NERG en wier studie zo ver is gevorderd dat een vruchtbaar lidmaatschap mogelijk is. Zodra een junior-lid is afgestudeerd wordt hij/zij automatisch gewoon lid.

Het NERG heeft thans ruim 800 leden en kan zich verheugen in een gestaag groeiend ledental, een noodzakelijke voorwaarde voor het voortbestaan. Het jaarlijks ledenverlies duidt op een vernieuwing van het ledenbestand van ongeveer eens per dertig jaar. De verbondenheid van de leden met ons genootschap blijkt dus uit hun trouw.

AANTAL NERG - LEDEN



Het lidmaatschap biedt belangrijke voordelen. De leden zijn in hun professionele activiteit veelal diepgaand bezig met als regel zeer smalle specialisaties binnen het brede aandachtsgebied van het NERG. De werkvergaderingen en excursies van het NERG bieden hen een unieke kans om het overzicht over al die ontwikkelingen op dit gebied te bewaren, liefst in een direct contact met degenen die daarmee bezig zijn.

Naast de professionele oriëntatie geven de werkvergaderingen bovendien in de pauzes en tijdens de lunches in ruime mate de gelegenheid tot het leggen van zakelijke contacten met sprekers, leden en introducé(e)s en het versterken van persoonlijke banden; een sociaal aspect waaraan de leden groot belang hechten.

HET NERG VAN STRAKS

Het NERG vormt in Nederland een zeer waardevol cultuurgoed, dat wij moeten koesteren. Wat onze leden onderling verbindt, is de wens tot verbreiding van de wetenschappelijke kennis en methoden op het gebied van de elektronica en radiotechniek en hun wens tot bekendheid met de onderzoeksprojecten en -resultaten in dit vakgebied. Zij willen dit in saamhorigheid doen. Het is een grote uitdaging deze doelstelling, woekerend met de mogelijkheden van ons genootschap, actueel en op boeiende wijze met elkaar te blijven operationaliseren.

Moge het aan de huidige generatie ingenieurs gegeven worden het NERG volgens zijn beste tradities in een bestendige activiteit naar een succesvolle toekomst te leiden, ten voordele van de beoefening van de elektronica en de telecommunicatie- en informatietechniek door de toekomstige ingenieurs in ons land.

VERANTWOORDING

1 Er zijn veel bronnen beschikbaar voor de vroege geschiedenis van de radio en elektronica. De daarin vermelde gegevens stemmen niet steeds overeen. Voornamelijk is geput uit:

Ir.Dr. A. Korevaar: "Historiografiek van de Electriciteit en de

Elektrotechniek" (opgenomen in de Elektrotechnische W.P.), Elsevier, Amsterdam, 1958.

William R. Bennett and James R. Davey: "Data Transmission" (chapter I-8 Wireless Telegraphy), McGraw-Hill Book Company, New York, 1965.

2 Susskind komt na grondige analyse van het werk van beiden tot de conclusie: "if any single individual may be designated as the 'inventor of radio' (i.e. radiotelegraphy), it is Marconi."
Susskind, C.: "Popov and the Beginnings of Radiotelegraphy", Proceedings IRE, vol. 50, no. 10, pp. 2036-2047, October, 1962

3 Prof.Dr. C.E. Mulders (secretaris N.R.G.): "40 jaar Nederlands Radiogenootschap", Tijdschrift van het Nederlands Radiogenootschap, deel 25, nr. 4, pag. 177 e.v., december 1960.

4 De lange naam 'Nederlands Radiogenootschap' werd als regel afgekort tot 'N.R.G.'. Om de breuk met het verleden niet nog groter te maken, drong een aantal leden aan op het gebruik van de afkorting 'N.E.R.G.', dus met puntjes en uitgesproken als N-E-R-G. Het acroniem NERG was voor hen een door merg en been gaande gruwel. In de loop der jaren zijn hiervan de scherpe puntjes afgesleten en wordt 'NERG', zeker door de jongere leden, als verkorte naam gebezigd. Een aantal oudere leden heeft nog steeds moeite met dit te aanvaarden.

Van de voorzitter van de jubileumcommissie "75 jaar NERG":

Beste NERG-leden,

Ten behoeve van de viering van het 75-jarig bestaan van het NERG werd eind 1993 de commissie "75 jaar NERG", bestaande uit ir P.R.J.M.(Paul) Smits, ir P.G.M.(Peter) Baltus, Dr.ir R.C. (Richard) den Dulk, Dr.ir W.M.C.J.(Ineke) van Overveld, ir P.P.M.(Phil) van der Zalm, Prof.dr.ir. W.M.G.(Wim) van Bokhoven en mijzelf, opgericht.
Naderhand werd deze commissie nog aangevuld met ing. A.A. (Arie) Spanjersberg, hoofdredacteur van het NERG tijdschrift.

De commissie had tot doel een programma voor de viering van het 75-jarig bestaan van het NERG te realiseren.
De commissie was het er al snel over eens dat in het jubileum-programma de drie hoofdactiviteiten van het NERG, te weten:
- het organiseren van werkvergaderingen
- het uitgeven van het NERG tijdschrift, en
- de onderwijsactiviteiten,

zoveel mogelijk tot uitdrukking dienden te komen.

Met betrekking tot de werkvergaderingen werd als rode draad voor de keuze van de onderwerpen tijdens het jubileumjaar van mei 1995 tot mei 1996 gekozen voor het thema: "Het NERG zo breed als het spectrum".
Door de NERG Programma-manager ir W. (Wim) van der Bijl is een en ander nader uitgewerkt.
Het jubileumjaar zal worden geopend met een feestelijke bijeenkomst op 23 mei 1995 bij de Amercentrale te Geertruidenberg waarmede het spectrum tot 50 Hz zal worden bestreken, en het jaar zal in mei 1996 waarschijnlijk worden besloten met een werkvergadering met als onderwerp Gamma straling en Radioactiviteit. Verder zullen in de loop van het jubileumjaar circa 11 werkvergaderingen worden gehouden met onderwerpen die telkens een ander gedeelte van het tussenliggende spectrum zullen bestrijken.

Voor wat betreft het tijdschrift werd besloten aan het begin van het jubileumjaar in mei 1995 dit thans in Uw bezit zijnde speciale jubileumnummer uit te geven en verder alle volgende nummers gedurende het jubileumjaar te voorzien van het logo "75 jaar NERG".
In dit jubileumnummer zijn ondermeer enige artikelen opgenomen van gerenommeerde auteurs op het gebied van de elektronica. In het eerste artikel wordt een verbinding gelegd tussen een belangrijke historische publikatie en de huidige stand van de techniek, te weten op het gebied van de chaostheorie. Het tweede artikel geeft een historisch overzicht tot en met de huidige situatie van data-transmissie.
U treft in dit jubileumnummer ook een verzameling aan van anekdotes/verhalen van oudere NERG leden met betrekking tot interessante historische gebeurtenissen uit de elektronica welke zij van nabij hebben meegemaakt.
Voorts is aan dit jubileumnummer als bijlage toegevoegd een inhoudsopgave van alle artikelen die in de loop der jaren in het NERG tijdschrift zijn verschenen. Op basis van die inhoudsopgave is door de hoofdredacteur een analyse gemaakt van enige aspecten van het tijdschrift door de jaren heen.

Om de geschiedenis van het NERG vast te leggen heeft de commissie overwogen om een gedenkboek uit te doen geven, doch uiteindelijk is besloten van een modern medium gebruik te maken om de geschiedenis van het NERG en de relatie met belangrijke gebeurtenissen uit de elektronica vast te leggen, te weten een CD-ROM.
Dankzij de grote personele inspanningen van Professor van Bokhoven zal naar verwachting eind 1995 een speciale NERG CD-ROM worden uitgebracht, waarmee met behulp van een CD-ROM speler en een Personal Computer met audio-kaart en Windows op moderne wijze de geschiedenis van het NERG en historisch belangrijke gebeurtenissen op het gebied van de elektronica zichtbaar en soms hoorbaar kunnen worden gemaakt.
Tevens zal op deze CD-ROM ook de al eerder genoemde inhoudsopgave van de artikelen uit de NERG tijdschriften worden opgenomen.
Waarschijnlijk zal tijdens de opening van het jubileumjaar op 23 mei 1995 bij de Amercentrale te Geertruidenberg een voorlopige versie van deze CD-ROM worden gedemonstreerd.

De commissie heeft diverse pogingen ondernomen om in het kader van 75 jaar NERG ook een tentoonstelling te organiseren, doch de bereidheid bij de industrie om aan een dergelijke tentoonstelling mede te werken was zeer teleurstellend zodat een en ander niet was te realiseren.

Tenslotte ligt het in het voornemen om in het kader van het jubileum nog een prijsvraag te organiseren voor NERG leden en studenten aan technische universiteiten in Nederland.
Deze prijsvraag houdt in dat men de parameters van een draadloos data transmissie systeem dient te bepalen waarmee een zo betrouwbaar mogelijke verbinding tot stand kan worden gebracht binnen een vastgesteld budget.

Ik hoop dat ik U met het bovenstaande een goede indruk heb kunnen geven ven de jubileum-activiteiten in het kader van het 75-jarig bestaan van het NERG.

Met vriendelijke groeten,

ir C.Th.(Kees) Koole
voorzitter van de jubileumcommissie "75 jaar NERG"

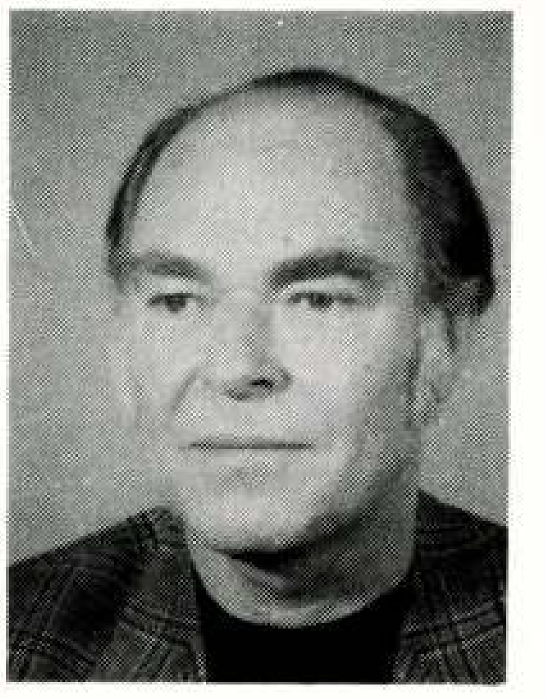
TRILLINGSVERSCHIJNSELEN IN NIET-LINEAIRE CIRCUITS

Fred Neerhoff

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Elektrotechniek

Summary

In this tutorial paper, nonlinear circuit oscillations are placed in a historical context. A short introduction to elementary nonlinear circuit theory is included. The dynamical route and the associated jump phenomenon are presented as key concepts in nonlinear first order dynamics. Hysteresis is understood as nonlinear first order parasitic dynamics. State-space concepts are introduced by second order autonomous circuits. Then, relaxation oscillations are explained as parasitic limit-cycle behaviour. Second order, non-autonomous Van der Pol and Duffing circuits are used throughout as a vehicle to illustrate forced nonlinear oscillations. Subharmonic and quasi-periodic oscillations are classified by Poincaré cross-sections. Next, the concept of a chaotic attractor is presented, followed by the period-doubling and period-adding bifurcation routes to chaos. Finally, a concise treatment of Chua's oscillator is given. The existence of a homoclinic point is indicated as a key for chaotic oscillation. A list of off-the-shelf components for building a robust Chua's oscillator is also included. In conclusion, some applications of the theory are briefly mentioned.



1. INLEIDING

Met de transistor als bepalende bouwsteen zijn elektronische circuits per definitie niet-lineair. Niettemin zijn lineaire ontwerpmethoden uiterst succesvol gebleken. Zij worden gerechtvaardigd doordat het statische niet-lineaire instelcircuit veelal kan worden gescheiden van een in essentie lineair signaalcircuit. Daarbij zorgt de instelling ervoor dat het dynamische gedrag zich afspeelt op de lineaire gedeelten van de niet-lineaire transistor karakteristieken.

De keuze voor een lineaire strategie lijkt evenwel minder logisch bij het ontwerp van bijvoorbeeld geheugen of oscillator circuits. Daar waar de niet-lineaire circuit dynamica juist een centraal aspect van het werkingsmechanisme is, kan een lineaire invalshoek gemakkelijk tot omslachtige en zelfs misleidende beschouwingen leiden.

De aantrekkingskracht van de lineaire aanpak is duidelijk: met de gecombineerde toepassing van de Fourier-theorie en het superpositie beginsel kan het lineaire, algebraïsche denken tot in het frequentie-domein worden doorgezet. Indien de circuit eigenschappen voor een enkele frequentie expliciet bekend zijn, kan de signaal uitkomst voor alle frequenties moeiteloos worden voorspeld. Voor digitale circuits geldt een analoog argument.

Bij een fundamenteel niet-lineaire opzet faalt deze strategie: het superpositie beginsel is niet langer geldig. Naast allerlei ingewikkelde, weinig flexibele analytische benaderingstechnieken rest dan slechts een numerieke aanpak. De resulterende 'brute force' berekeningen hebben echter op hun beurt het nadeel weinig inzichtelijke uitkomsten op te leveren.

In deze onbevredigende situatie tekent zich de laatste decennia een ontwikkeling ten gunste af. Bij het ruim beschikbaar komen van computerfaciliteiten, werden numerieke experimenten al snel gemeengoed. Daarbij werd, geheel onverwacht, 'ontdekt' dat zelfs zeer eenvoudige niet-lineaire systemen een zeer complex, ja zelfs chaotisch aandoend gedrag kunnen vertonen. Aanvankelijk werden de nieuwe, langs numerieke weg verkregen inzichten met grote scepsis onthaald. Velen konden zich eenvoudigweg niet goed voorstellen dat deterministische modellen in de praktijk tot slechts beperkt voorspelbare uitkomsten kunnen leiden. En bovendien, waarom waren die verschijnselen niet eerder waargenomen?

De werkelijkheid is subtieler dan de vraag suggereert. Chaotische verschijnselen zijn welzeker eerder waargenomen, maar werden wegens het ontbreken van een valide interpretatiekader doorgaans toegeschreven aan 'experimentele ruis', of bleven anderszins in de mist hangen.

Uiteindelijk hebben experimenten aan een scala van relevante fysische niet-lineaire systemen het eerdere ongeloof doen omslaan in massieve nieuwsgierigheid. En, wegens het hopeloos tekort schieten van lineaire verklaringsmodellen, werden de geïnteresseerden wel gedwongen naar nieuwe conceptuele kaders te zoeken.

Die nieuwe concepten gaan terug tot H. Poincaré, die aan het eind van de vorige eeuw een studie ondernam naar planeet bewegingen. De wiskundigen die de geometrische, kwalitatieve aanpak van Poincaré sindsdien verder hadden ontwikkeld, deden dat in betrekkelijk isolement van de meer toegepaste wetenschappen. Maar halverwege de jaren zestig, beginjaren zeventig, was de tijd rijp voor een wederzijdse toenadering. Een stormachtige opleving van de niet-lineaire dynamica was het gevolg. Na nog eens tien, vijftien jaar, werden de effecten duidelijk merkbaar in de elektrotechniek, gepaard gaand met een toenemende, hernieuwde openstelling voor de niet-lineaire optiek.

Het is verheugend dat het Nederlands Elektronica- en Radio-Genootschap heeft besloten om bij haar 75-jarig jubileum aandacht te geven aan de geschetste ontwikkeling, om die in de historische context van de eigen traditie te plaatsen. Daartoe moet in de eerste plaats het werk van B. van der Pol en G.J. Elias worden gerekend. Van beiden verscheen in dit tijdschrift een reeks artikelen met als overkoepelend thema de behandeling van trillingsverschijnselen in niet-lineaire circuits [1], [2]. Beiden speelden tevens een prominente administratieve rol in het Genootschap. B. van der Pol als oprichter van het Nederlands Radiogenootschap (voorloper van het NERG) en G.J. Elias als eerste voorzitter na de tweede wereldoorlog.

De door Van der Pol en Elias behandelde, gescheiden problematiek klinkt tot op heden door in de moderne ontwikkelingen. Het eenvoudige, maar niet-lineaire RLC-circuit dat Elias in de periode van 1946 tot 1951 onderzocht, is een lopend studie-object. Nog pas in 1978, heeft Y. Ueda met inzet van computers gevonden dat dit circuit onder omstandigheden in chaos kan geraken. Deze ontdekking werd van dermate groot belang geacht dat Ueda er in 1986 het National Museum of Sciences te Parijs mee haalde. Anders dan Elias, heeft Van der Pol zijn onderzoek naar niet-lineaire trillingsverschijnselen ook steeds gepubliceerd in de internationale vakliteratuur [3]. Het samen met J. van der Mark in 1927 uitgevoerde experiment naar frequentie-deling geldt thans als het klassieke voorbeeld van wèl geobserveerde, maar niet als zodanig onderkende chaos. Een overdruk van het in Nature gepubliceerde artikel is bijgevoegd. Naar algemeen oordeel, geldt Van der Pol met zijn onderzoek naar relaxatie trillingen, limit-cycles en synchronisatie thans als één van de meest prominente voorlopers op het gebied van de moderne niet-lineaire dynamica.

Dit artikel is als volgt ingedeeld. Ter tegemoetkoming aan voornamelijk 'lineair' opgeleide ingenieurs, wordt in paragraaf 2 eerst een elementaire inleiding gegeven in de niet-lineaire circuit theorie. De theorie beperkt zich uitdrukkelijk tot ruisvrije modellen (zie [4], [5] en [6] voor inleidende studieboeken, [7] is al meer geavanceerd).

Paragraaf 3 behandelt niet-lineaire, autonome circuits van de orde één (één dynamisch element). Middels het kwalitatieve begrip 'dynamische route' en het daarmee verbonden sprongverschijnsel, worden relaxatie trillingen in de autonome Van der Pol oscillator verklaard. Tevens wordt de hysterese van de Schmitt-trigger uitgelegd als niet-lineaire parasitaire dynamica.

Het toestandsconcept wordt in paragraaf 4 geïntroduceerd. Er wordt gestart met niet-lineaire, autonome circuits van de orde twee. De oplossingen van de beschrijvende circuit vergelijkingen (hier opgevat als toestandsvergelijking) worden à la Poincaré geïnterpreteerd als baanbewegingen in de toestandsruimte (ruimte opgespannen door de toestandsvariabelen: spanningen over capaciteiten en stromen door inductiviteiten). Het toestandsbeeld geeft in één oogopslag een kwalitatief inzicht in de circuit dynamica. De daarin voorkomende geometrische objecten van aantrekking (afstoting) worden attractors genoemd. Ingezien wordt dat evenwichtpunten en limit-cycles (periodieke trillingen) de enige attractors zijn in een twee-dimensionale toestandsruimte. Voor meer complexe dynamica zijn tenminste drie vrijheidsgraden nodig. Tenslotte wordt het begrip bifurcatie geïntroduceerd als een drastische verandering van de kwalitatieve circuit dynamica.

Paragraaf 5 geeft een uiteenzetting van subharmonische en quasi-periodieke trillingen in de toestandsruimte van niet-lineaire, niet-autonome (aangedreven) circuits van de orde twee (drie vrijheidsgraden). De Van der Pol oscillator en een zogenaamd Duffing-circuit staan model. Daarin is het samenstellende, niet-lineaire element respectievelijk een actieve weerstand en een reactantie. Het circuit van Elias wordt herkend als behorende tot de tweede categorie. Een geschikt gekozen, zogenaamde Poincaré-doorsnede in een naar drie dimensies uitgebreide toestandsruimte blijkt een ingenieus hulpmiddel ter classificatie van niet-lineaire trillingsverschijnselen.

De chaotische trillingen van paragraaf 6 onderscheiden zich door een grillig verloop in de tijd te combineren met een continu frequentiespectrum. De ordening die deze trillingen niettemin vertonen, wordt weerspiegeld in de structuur van de bijbehorende chaotische attractor. De geselecteerde niet-lineaire, niet-autonome circuits van de orde twee (drie vrijheidsgraden) illustreren hoe bij verandering van een circuit-parameter het kwalitatieve gedrag zelfs zó drastisch kan wijzigen dat chaos optreedt. Twee prototypen van zulke bifurcatiewegen naar chaos worden behandeld. Daarbij wordt ingespeeld op het bijgevoegde artikel van Van der Pol en Van der Mark uit 1927, alsook op het werk van Elias. De paragraaf wordt afgesloten door het werk van Van der Pol in historisch perspectief te plaatsen.

Paragraaf 7 geeft een beknopte uiteenzetting van de oscillator van Chua. Dit is een niet-lineair, autonoom circuit van de orde drie. Bij een juiste instelling produceert het circuit chaotische trillingen. In dat geval zorgt de interactie tussen twee instabiele evenwichtspunten voor een in zichzelf gesloten, zogenaamde homocline baan. Daarvan impliceren de baankarakteristieken een herhaald vouw en strek mechanisme dat de onderliggende ordening van de chaotische attractor bepaalt. Men beweert dat het circuit van Chua het enige thans bestaande fysische systeem is waarbij chaotisch gedrag zowel experimenteel, numeriek als analytisch is aangetoond. Met de bijgevoegde lijst van standaard verkrijgbare componenten kan men er zelf mee experimenteren.

Tot slot worden in paragraaf 8 enige toepassingen van de theorie aangestipt.

Veel in dit artikel is ontleend aan de speciale IEEE-nummers die aan dit onderwerp zijn gewijd [8] t/m [12]. Een boeiend, en voor de leek geschreven overzicht van de moderne ontwikkelingen in de niet-lineaire dynamica door alle wetenschappen heen, is [13]. De vakliteratuur is overstelpend, en wegens het hoge wiskundige gehalte nog eens extra moeilijk toegankelijk. Als niet-wiskundige introductie zou [14] of [15] geprobeerd kunnen worden. De inleidingen [16] en [17] zijn weliswaar wiskundig maar elementair. Geavanceerder maar opvallend helder zijn [18], [19], en [20] als exponent van de Russische school.

2. NIET-LINEAIRE ELEKTRISCHE CIRCUITS

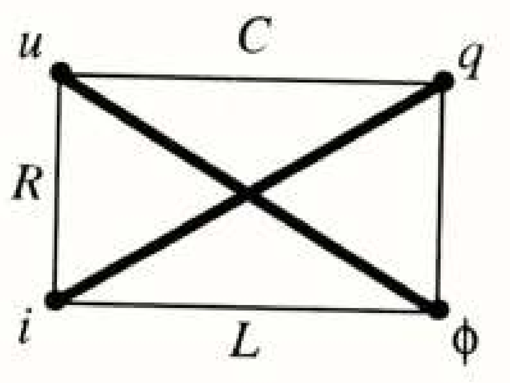
2.1 Grondslagen

Van de *basisgrootheden*: stroom i, spanning u, lading q en magnetische flux ϕ, worden de twee laatste opgevat als hulpgrootheden. Zij kunnen gerelateerd worden aan de twee eerste via de tijdsintegraties $q = \int i dt$ en $\phi = \int u dt$. De behoudswet van lading en magnetische flux gaat dan respectievelijk over in de *stroomwet* en de *spanningwet* van Kirchhoff. De gezamenlijke geldigheid van genoemde behoudswetten impliceert de *behoudswet van elektromagnetische energie* in elektrische circuits (geen ontsnappende elektromagnetische stralingsenergie).

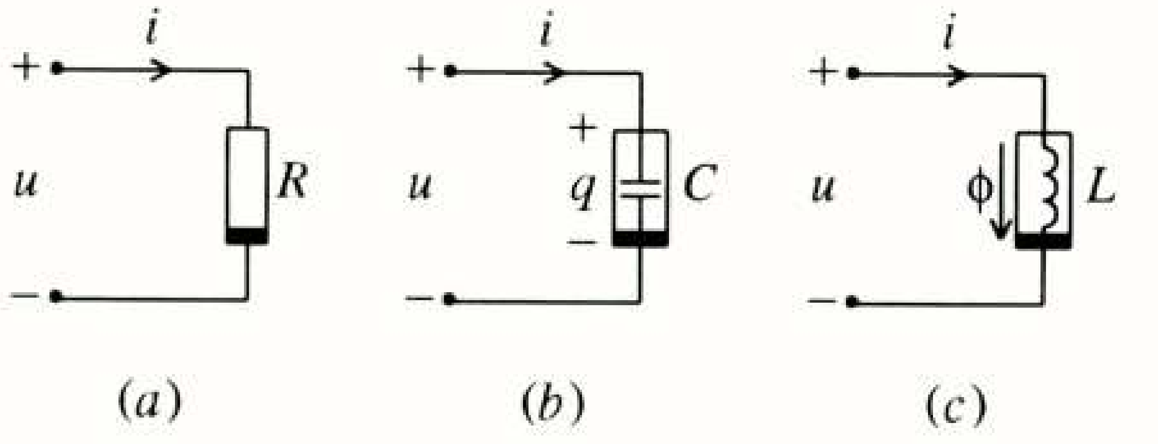
De *wetten van Kirchhoff* beschrijven de interconnecties tussen de samenstellende componenten (de *circuit structuur*). Het zijn *lineaire, algebraïsche* betrekkingen tussen respectievelijk stromen en spanningen. Samen met de u-i-relaties van de componenten bepalen zij het elektrische gedrag volledig.

Indien de optredende elektromagnetische verschijnselen tot op elementair (d.w.z. onderling niet herleidbaar) niveau worden uiteengerafeld, komt men uit bij de circuit elementen (primitieven). Preciezer: een *circuit element* bepaalt op elk tijdstip een nog vrij te kiezen algebraïsche relatie (de *constitutieve relatie*) tussen twee van de vier basisgrootheden i, u, q en ϕ. (N.B. Met *algebraïsch* wordt een instantaan verband bedoeld.) Gelet op de reeds bestaande betrekkingen tussen de basisgrootheden, zijn daar vier van de zes mogelijke combinaties voor beschikbaar. De paren $\{u,i\}$, $\{q,u\}$ en $\{\phi,i\}$ staan respectievelijk voor de *weerstand R*, de *capaciteit C* en de *inductiviteit L*. Het paar $\{q,\phi\}$ definieert de zogenaamde memristor, die hier verder onbesproken blijft. Figuur 1 geeft een over-

zicht van de basisgrootheden, terwijl in figuur 2 de circuit symbolen van de (twee-klemmen) elementen staan afgebeeld.



Figuur 1. Relaties tussen de basisgrootheden.

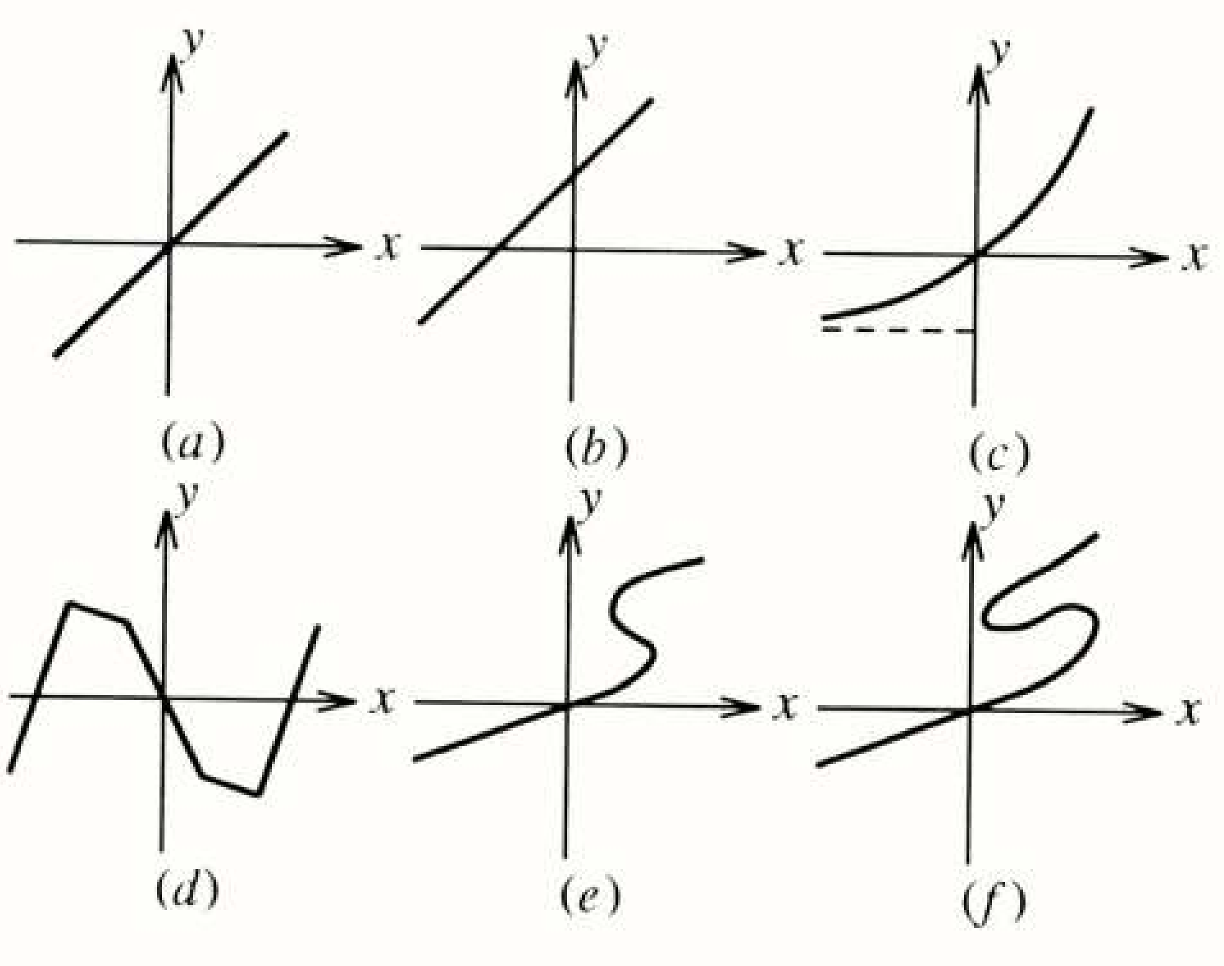


Figuur 2. Circuit symbool van de weerstand R (a), de capaciteit C (b) en de inductiviteit L (c).

2.2 Eigenschappen circuit elementen

Een element is *lineair* als de constitutieve relatie een evenredigheid is. Zo niet, dan is het element *niet-lineair*. Verder is een element *tijd-invariant* (autonoom) als de constitutieve relatie niet expliciet van de tijd t afhangt. Is dit juist wel zo, dan is het element *tijd-variant* (niet-autonoom). Uitgezonderd de bronnen, wordt in dit artikel steeds uitgegaan van autonome elementen.

De *karakteristiek* van een element is de grafische voorstelling van de constitutieve relatie. Figuur 3 geeft voorbeelden. Daarin zijn de symbolen x en y constituerende variabelen; in het algemeen zijn het functies van de tijd t, genoteerd als $x = x(t)$ en $y = y(t)$.



Figuur 3. Karakteristieken van elementen (x en y zijn constituerende variabelen).

Karakteristiek (a) staat voor een lineair element; de overige hebben betrekking op niet-lineaire exemplaren. Karakteristiek (b) is weliswaar een rechte, maar die gaat niet door de oorsprong (vertolkt geen evenredigheid). Het ermee corresponderende element wordt hier *affien* genoemd. (N.B. Een affiene algebraïsche relatie heeft de vorm $y = ax + b$ met $b \neq 0$.) Het niet-lineaire element met karakteristiek (c) vertoont verzadiging. Met $x = u$ en $y = i$ stelt het een exponentiële *diode* voor. Karakteristiek (d) bestaat uit aaneengesloten rechte lijnsegmenten die niet alle door de oorsprong gaan; we noemen het een *stukgewijs affiene* karakteristiek.

Een element is *x-bestuurd* indien y in strikt wiskundige zin een *functie* is van x, genoteerd als $y = \tilde{y}(x)$. Elementen met karakteristiek (a), (b) en (c) zijn zowel x- als y-bestuurd; hun constitutieve functievoorschriften hebben alle een inverse. Het element met karakteristiek (d) is x-, maar niet y-bestuurd; $\tilde{y}$ heeft geen inverse. Bij karakteristiek (e) is dit juist andersom; daar is $x = \tilde{x}(y)$, terwijl de inverse van $\tilde{x}$ niet bestaat. Tenslotte is het niet-lineaire element met karakteristiek (f) noch x-, noch y-bestuurd.

Een (niet-lineaire) *weerstand* is *passief* als zijn karakteristiek buiten het tweede en vierde kwadrant blijft. In laatstgenoemde kwadranten is het toegevoerde vermogen $p = ui < 0$, hetgeen de weerstand *actief* maakt (voor een weerstand is $x = u$, $y = i$). Weerstanden met karakteristiek (b) en (d) zijn actief, de overige zijn passief. Een actieve weerstand bevat een interne batterij (zie verderop). Realistische weerstandskarakteristieken liggen voor voldoend grote waarden van i en u steeds in het eerste en vierde kwadrant (vertonen voor die waarden een passief gedrag).

Een saillante observatie is dat de onafhankelijke *bronnen* met variërende sterkte kunnen worden opgevat als tijd-variante, niet-lineaire *weerstanden*. Hun karakteristiek is op elk tijdstip een niet door de oorsprong gaande rechte, evenwijdig aan één van de assen in het u-i-vlak. Volgens deze visie is een stroom(spannings)bron een spannings(stroom)-bestuurde affiene weerstand.

Weerstanden waarvan de karakteristiek delen met een negatieve helling vertoont, overeenkomend met een negatieve *differentiaal* weerstand, heten *negatieve resistantie* elementen.

Indien de karakteristiek (geen) symmetrie t.o.v. de oorsprong vertoont, is het element *(niet-) symmetrisch*. Bij niet-symmetrische elementen moet er onderscheid worden gemaakt tussen de klemmen; vandaar het zwarte balkje in de circuit symbolen van figuur 2 (vergelijk het standaard symbool van de diode en de batterij). Alleen bij symmetrische elementen is het balkje overbodig (vergelijk de karakteristieken van figuur 3a en 3d).

De *u-i-relatie* van de weerstand is identiek aan de constitutieve relatie ervan. Het is een instantaan reagerend of *statisch* element. De u-i-relaties van de capaciteit en de inductiviteit worden verkregen door respectievelijk $q = \int i dt$ en $\phi = \int u dt$ in de (algebraïsche) constitutieve relaties te substitueren. De resulterende tijdsintegraties in hun u-i-relaties maakt ze tot *dynamische* elementen. Er volgt dat de bovengrens van hun dynamiek wordt gegeven door de *continuïteitsregel*, die stelt dat de spanning over een al dan niet lineaire C (de stroom door een L) niet kan springen zolang de stroom erdoor (de spanning erover) geen stoot bevat. Onder *statische condities* gedragen de capaciteit en de inductiviteit zich respectievelijk als een open klemmenpaar en een kortsluiting.

De elementen van figuur 2 zijn een ruw *model* van respectievelijk een materiële *weerstand* (waaronder een gevarieerd assortiment van resistieve halfgeleider bouwstenen), *condensator* en *spoel*. In die zin zijn het idealisaties van de werkelijkheid. (N.B. *Metingen* aan negatieve resistantie elementen dienen behoedzaam te geschieden. De invloed van inherente *parasitaire effecten* kan de metingen gemakkelijk laten mislukken [21].)

Ofschoon bovenstaande bespreking zich toespitste op twee-klemmen elementen, vallen *meer-klemmen* elementen eveneens binnen de theorie. De scalaire constitutieve relaties worden daartoe vervangen door vectoriële algebraïsche relaties. Hiermee kan een *transistor* (van 'transfer resistor') en een *operationele versterker* (op-amp) in eerste aanleg worden gemodelleerd door respectievelijk een (niet-lineaire) drie- en vier-klemmen *weerstand*.

2.3 Circuit vergelijkingen

Nadat de elektromagnetische verschijnselen die zich in een materieel circuit voordoen, zijn vertolkt door circuit elementen (inclusief de relevante parasitaire effecten) wordt er een *model* verkregen, dat eveneens een elektrisch circuit wordt genoemd. De hierin optredende (tijdsafhankelijke) spanningen en stromen worden bepaald door de *circuit vergelijkingen*. Deze bestaan uit een blok *Kirchhoff-vergelijkingen*, aangevuld met een blok *u-i-relaties*, afkomstig van de samenstellende elementen. Ter verkrijging van een kleiner stelsel circuit vergelijkingen worden de *u-i*-relaties en de Kirchhoff-vergelijkingen in elkaar gesubstitueerd.

Daar de Kirchhoff-vergelijkingen lineair zijn, komen de eventuele niet-lineariteiten *exclusief* voort uit de *u-i*-relaties (daarbij de elektromagnetische materiaal eigenschappen van de materiële bouwstenen in rekening brengend).

In dit artikel worden de bouwstenen *ruisvrij* verondersteld. Dit voert tot *deterministische* circuit modellen. De tijdsafhankelijke uitkomsten kunnen derhalve nimmer onderhevig zijn aan het toeval.

Een circuit heet *niet-lineair* indien het circuit naast de onafhankelijke bron(nen) tenminste één niet-lineair element bevat.

De constructieregels voor (planaire) *duale* circuits zijn voor lineaire en niet-lineaire circuits gelijk. De karakteristieken van de duale elementen ontstaan door verwisseling van q en ϕ, alsmede van u en i. Daarbij gaat een capaciteit over in een inductiviteit met dezelfde (al dan niet-lineaire) karakteristiek, en andersom. Het duaal van een spannings(stroom)-bestuurde weerstand is een stroom (spannings)-bestuurde weerstand.

Circuits die naast bronnen uitsluitend bestaan uit (al dan niet-lineaire, en mogelijkerwijs meer-klemmen) weerstanden heten *resistieve circuits*. Indien het circuit tenminste één dynamisch element bevat, heet het een (al dan niet-lineair) *dynamisch circuit*. Een dynamisch circuit heet *autonoom* indien de samenstellende elementen (inclusief de onafhankelijke bronnen) alle tijd-invariant zijn. Zodra tenminste één onafhankelijke bron met variërende sterkte is opgenomen, heet het circuit *niet-autonoom*.

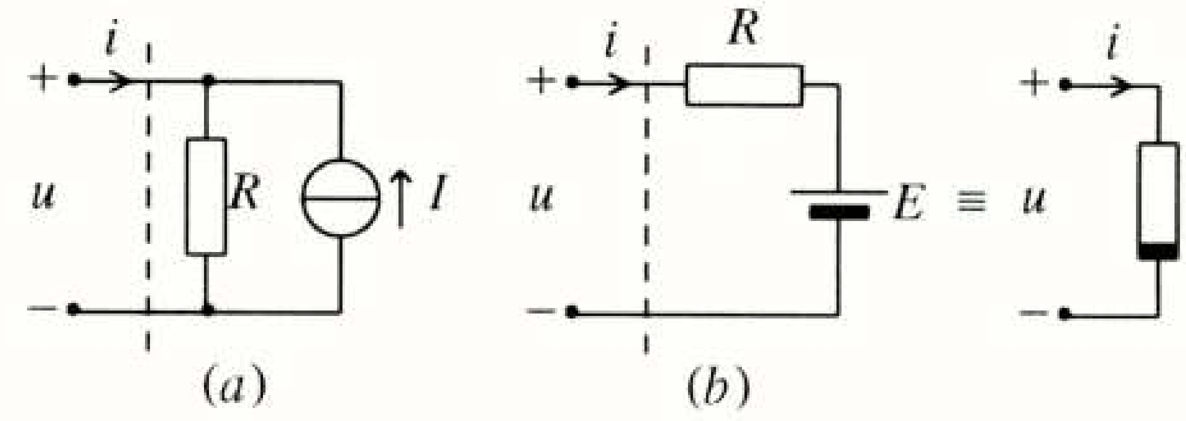
Resistieve circuits geven aanleiding tot (al dan niet-lineaire) *algebraïsche* circuit vergelijkingen. Dynamische circuits resulteren in (al dan niet-lineaire) *differentiaal* vergelijkingen.

Het oplossen van de circuit vergelijkingen stuit bij niet-lineaire circuits op extra moeilijkheden. Bovendien wordt het *inzicht* in de eigenschappen van die oplossingen sterk bemoeilijkt doordat met name het superpositie beginsel het laat afweten (en waardoor het centrale impedantie concept van de lineaire theorie eveneens op losse schroeven komt te staan).

Uiteindelijk beslissen *metingen* aan het materiële circuit over de geldigheid van op zichzelf correcte *berekeningen* aan het model circuit.

2.4 Niet-lineaire resistieve componenten

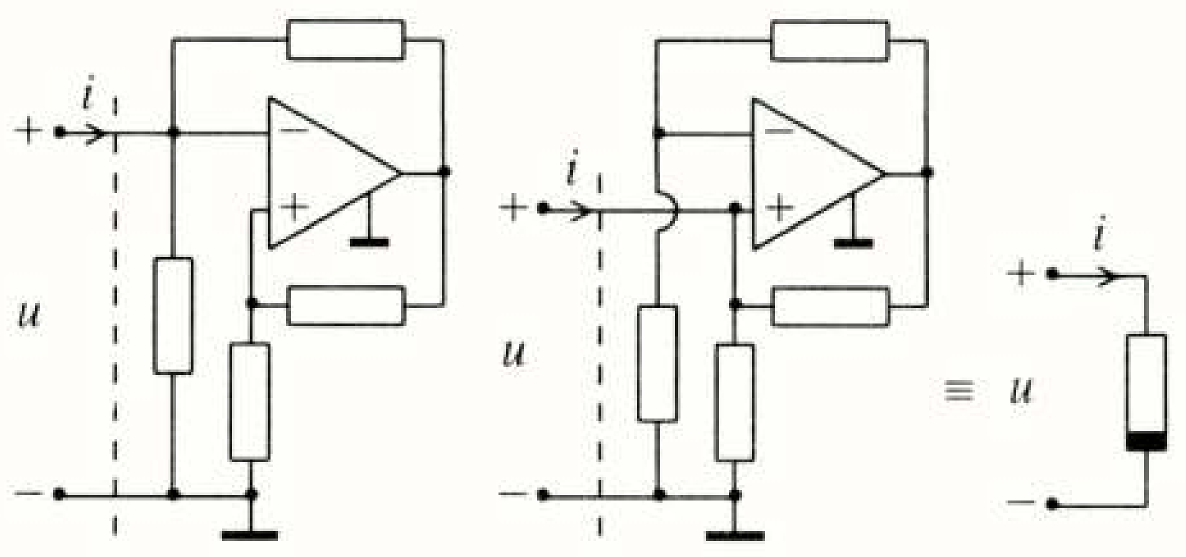
Het combineren van afzonderlijke resistieve elementen tot een enkele component, levert een scala van niet-lineaire weerstandskarakteristieken op. De standaard combinaties van figuur 4 gelden als elementaire voorbeelden. Zij hebben de affiene *u-i*-karakteristiek van figuur 3b.



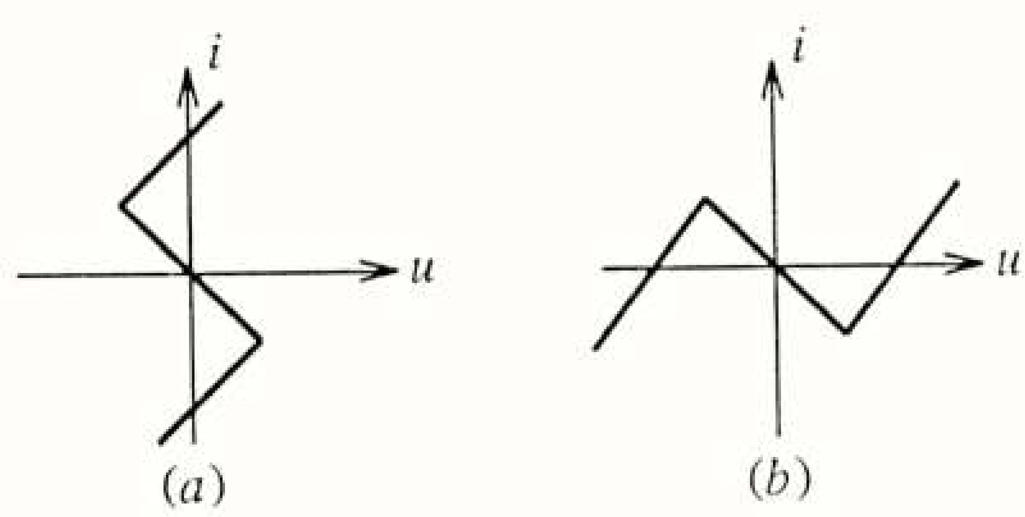
Figuur 4. Stroomdoos (a) en spanningsdoos (b).

Ter onderscheid van een (ideale)stroom/spanningsbron noemen we de resistieve componenten van figuur 4a en 4b in het vervolg respectievelijk een *stroomdoos* en een *spanningsdoos*. Zij kunnen in elkaar worden omgerekend via $E = RI$.

Een niet-lineair resistief op-amp model (met verzadiging) leent zich bij uitstek voor systematisch en robuust ontwerp [22]. Om de gedachte te bepalen, geeft figuur 5 principe configuraties. Middels elementaire methoden van de niet-lineaire circuit theorie worden daarbij de stuksgewijs affiene *u-i*-karakteristieken van figuur 6 gevonden.



Figuur 5. Niet-lineaire resistieve op-amp configuraties.

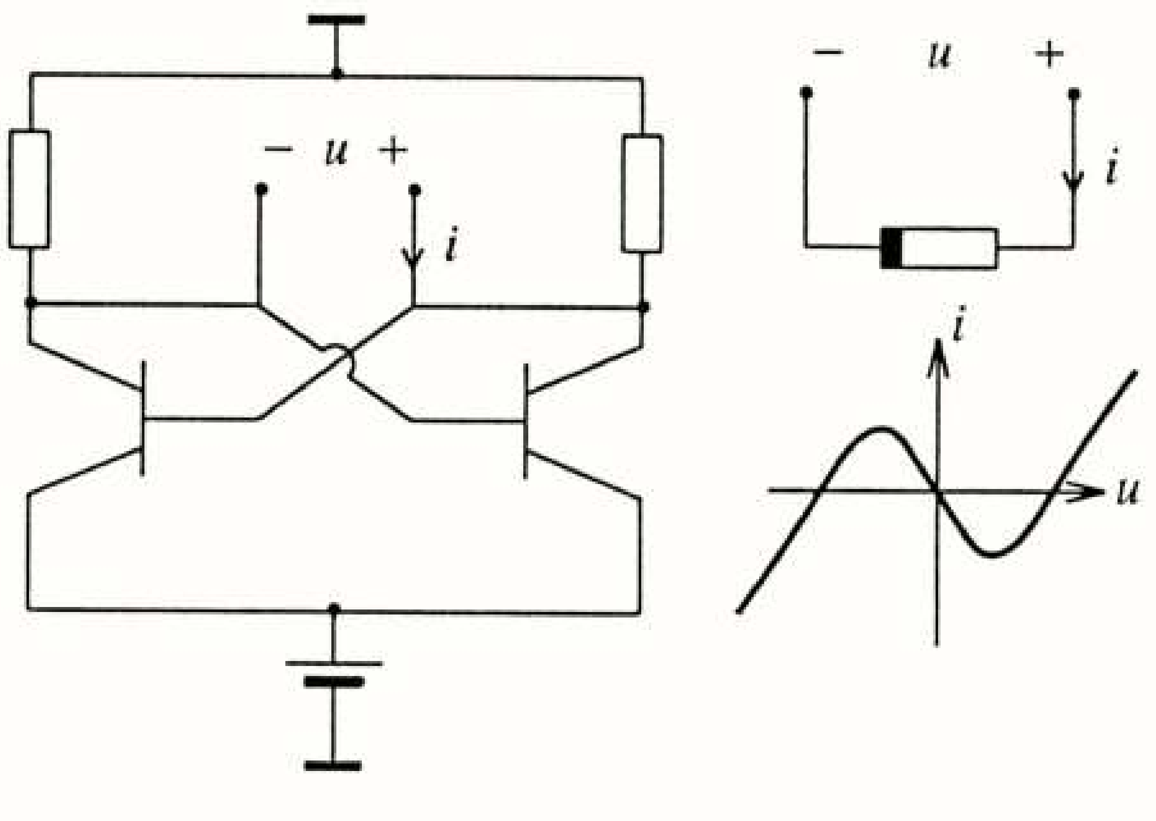


Figuur 6. u-i-karakteristieken behorend bij figuur 5.

Genoemde componenten zijn alle actief; steeds bevatten zij een interne batterij (de niet weergegeven voedingsbatterijen van de op-amp). Dezelfde eigenschappen kunnen worden gerealiseerd met transistor combinaties. In figuur 7 staat een klassiek voorbeeld. Door voor elke transistor een Ebers-Moll model te nemen, en de daarin voorkomende exponentiële dioden te vervangen door ideale exemplaren, kan een benaderde *u-i*-karakteristiek betrekkelijk eenvoudig worden berekend.

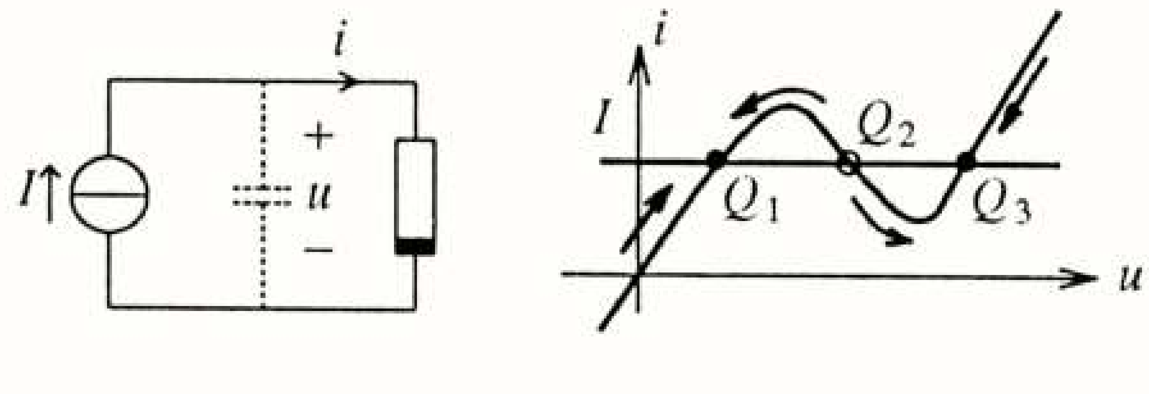
2.5 Meerdere oplossingen

Niet-lineaire resistieve circuits kunnen gemakkelijk meerdere discrete oplossingen hebben. Vaak is dat juist ook de bedoeling, zoals bij geheugen circuits. Is men evenwel gewend 'lineair' te denken, dan kan



Figuur 7. Eccles-Jordan transistor configuratie.

deze mogelijkheid even gemakkelijk tot begripsmoeilijkheden leiden. Zo heeft het resistieve circuit van figuur 8 de drie oplossingen Q_1, Q_2 en Q_3. Vanuit fysisch oogpunt bezien, kunnen deze natuurlijk niet gelijktijdig optreden. Het intellectuele ongemak wordt weggenomen indien er een *parasitaire* capaciteit (gestippeld weergegeven) wordt toegevoegd, waarna een niet-lineair autonoom *dynamisch* circuit ontstaat.



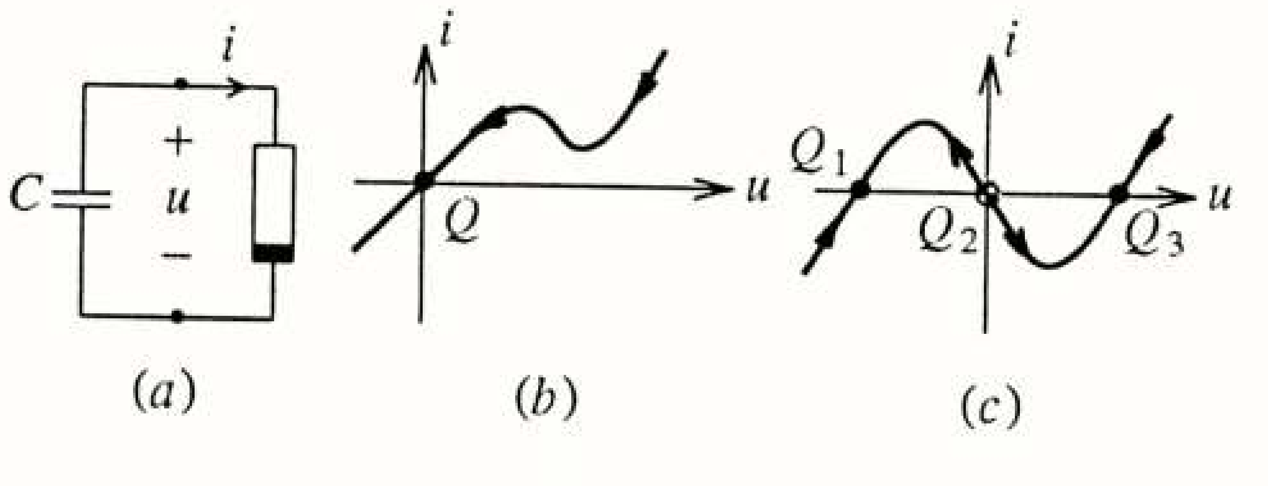
Figuur 8. De parasitaire capaciteit maakt het model volledig.

Gerekend vanaf een zeker begintijdstip, zal de capaciteit zich gedurig ont(op)laden, waarna het circuit uiteindelijk in de statische evenwichtstoestand geraakt. En, omdat de capaciteit zich onder statische condities als een open klemmenpaar gedraagt, resteert na enige tijd het oorspronkelijke resistieve circuit. Q_1, Q_2 en Q_3 kunnen nu worden geïnterpreteerd als de drie *mogelijke* oplossingen van het volledige model mèt parasiet. Een verdere analyse van het dynamische gedrag leert dat Q_1 en Q_3 de enige stabiele evenwichtspunten zijn. De theoretische oplossing Q_2 blijkt instabiel, en is derhalve *experimenteel niet waarneembaar*. In welke van de twee stabiele punten het circuit zich zal nestelen, hangt af van de *beginspanning* over de parasiet.

3. NIET-LINEAIRE DYNAMICA

3.1 Dynamische route

In figuur 9a staat een niet-lineair, autonoom dynamisch circuit van de *orde één* (één dynamisch element). De dynamica ervan wordt enerzijds bepaald door de *u-i*-relatie van de weerstand, en anderzijds door die van de capaciteit, hier $i = -C\,du/dt$. Dus, voor een punt op de *u-i*-karakteristiek geldt: zolang $i > 0$ (< 0) neemt u af (toe), resulterend in de *dynamische route* van het circuit; zie figuur 9b en 9c voor een *spanningsbestuurde* niet-lineaire weerstand. De dynamische route biedt *kwalitatief* inzicht in de dynamica. (N.B. Indien de niet-lineaire weerstandskarakteristiek in voldoend goede benadering kan worden vervangen door een stuksgewijs affien exemplaar, kunnen tevens *kwantitatieve* uitkomsten worden verkregen. Door elk samenstellend lijnsegment van de stuksgewijs affiene karakteristiek op te vatten als de affiene karakteristiek van een stroom- of spanningsdoos, kan bovendien worden gewerkt met een inzichtelijke circuit interpretatie.)

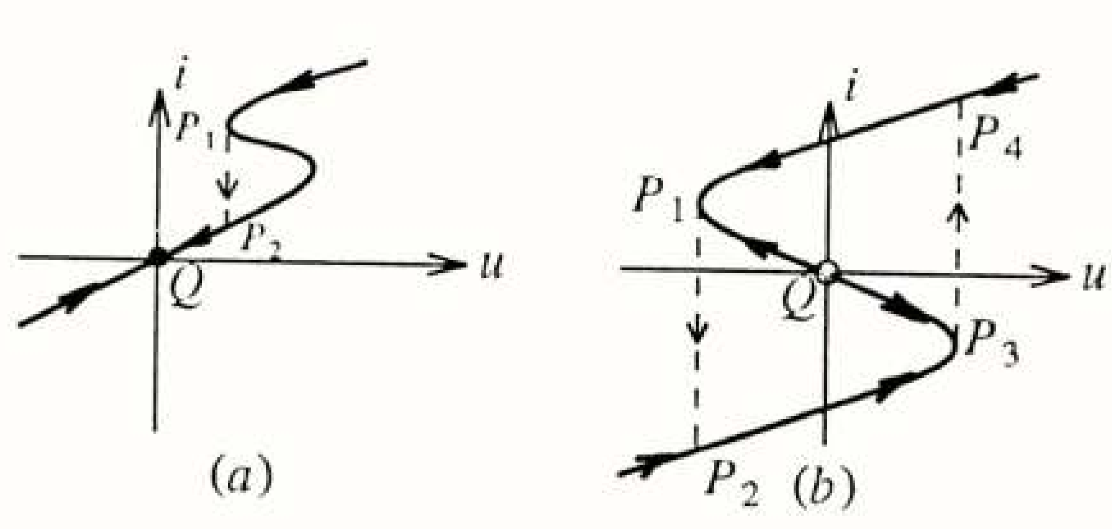


Figuur 9. Dynamisch circuit van de orde één (a) met dynamische route langs spanningsbestuurde u-i-karakteristiek (b) en (c).

In figuur 9b is Q een *stabiel* evenwichtspunt, overeenkomend met een lokaal *positieve* helling van de *u-i*-karakteristiek. Om dezelfde reden zijn Q_1 en Q_3 in figuur 9c beide stabiel, terwijl Q_2 daarentegen *instabiel* is (lokaal *negatieve* helling van de *u-i*-karakteristiek).

Het *bistabiele* circuit van figuur 9c wordt een sequentieel geheugen element (*flip-flop*) als er parallel aan de niet-lineaire weerstand van figuur 9a een stroombron wordt aangesloten die een trigger puls afgeeft (vergelijk het Eccles-Jordan paar van figuur 7). Als gevolg hiervan wordt de *u-i*-karakteristiek gedurende de puls evenwijdig aan zichzelf naar boven of naar beneden verplaatst, al naar gelang de bron een positieve of negatieve puls afgeeft. Aldus bewerkstelligt het triggersignaal bij voldoend grote pulsduur en pulshoogte een dynamische overgang van het ene stabiele evenwichtspunt naar het andere, en vice versa.

Er gelden extra overwegingen als de niet-lineaire weerstand in het circuit van figuur 9a *stroombestuurd* is, en *bovendien* geen spanningsbestuurde representatie toelaat (geen inverse heeft).



Figuur 10. Het sprongverschijnsel haalt het circuit uit de impassepunten P_1 en P_3.

Zodra in figuur 10a het punt P_1 wordt bereikt, treedt een *impasse* op: enerzijds kan een bewegend punt zijn weg langs de *u-i*-karakteristiek niet vervolgen, noch kan het op zijn schreden terugkeren ($i > 0$, u moet afnemen), terwijl het er anderzijds ook niet kan blijven liggen (dan zou de spanning over de capaciteit constant zijn, waarbij $i = 0$ behoort). De enige weg uit de impasse is om een vertikale, *instantane* sprong naar P_2 te maken, waarna de route naar het stabiele evenwichtspunt Q kan worden vervolgd. Dit *sprongverschijnsel* wordt fysisch bevredigend verklaard als er een extra *parasitaire serie inductiviteit* in het circuit wordt opgenomen. Dan wordt op grond van de eerder genoemde continuïteitsregel de stroom door de (kleine) serie inductiviteit ervan

weerhouden instantaan te springen. Aldus ontstaat er enige, doch verder te verwaarlozen vertraging in de overgang van P_1 naar P_2. (N.B. Alléén een *verticale* sprong is consistent met de continuïteitsregel voor de *capaciteit.*)

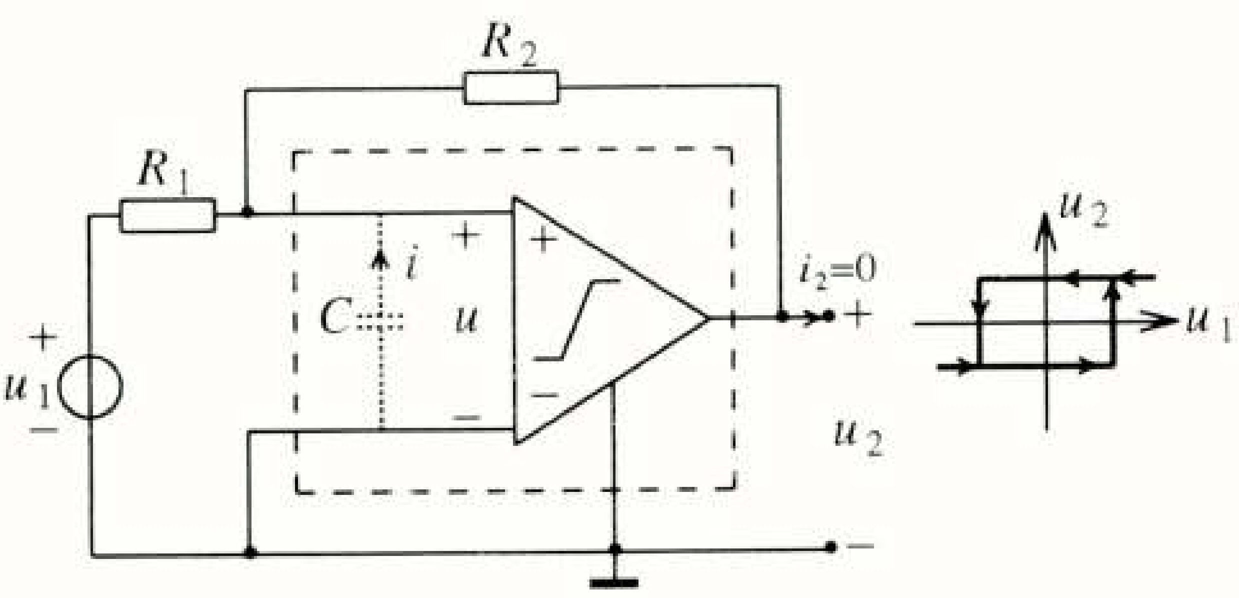
In figuur 10b zijn de sprongen onderdeel van een permanente, *periodieke* beweging die energetisch wordt onderhouden door de *actieve* niet-lineaire weerstand (interne batterij). Daarbij neemt $i = i(t)$ tussen P_4 en P_1 (P_2 en P_3) slechts geleidelijk af(toe) om op gezette tijden plotseling van waarde te veranderen. Daar de *periode* van deze trilling in essentie wordt bepaald door een *tijdconstante* (relaxatietijd), en niet door de trillingstijd van een *LC*-kring, heeft Van der Pol er de nu algemeen geaccepteerde naam *relaxatietrilling* voor bedacht [1d, e, f].

Zoals hierboven uiteengezet, krijgen de abrupte overgangen een fysische onderbouwing door een extra *parasitaire* serie *L* aan het *RC*-circuit van figuur 9a toe te voegen. De circuit vergelijkingen van het aldus gecompleteerde niet-lineaire *RLC*-circuit zijn voor het eerst door Van der Pol onderzocht. Voor een *kleine waarde* van de parasiet vond hij inderdaad de relaxatietrilling van hierboven. Met dezelfde aanname bleek hij eveneens in staat de werking van de *multivibrator* van Abraham en Bloch een fysische grondslag te geven, en stelde hij voor de *hartslag* als relaxatieverschijnsel op te vatten [1e] (een schot in de roos, naar achteraf bleek [23]).

Van der Pol heeft de naar hem vernoemde circuit vergelijkingen oorspronkelijk opgesteld voor een meegekoppelde *triodebuis-oscillator* met *parallel LC*-kring [1a]. Daarin komt de invloed van de triodebuis naar voren als de *duale* niet-lineaire weerstandskarakteristiek van figuur 10b, parallel aan de *LC*-kring. Met verwijzing naar het dualiteitsbeginsel, wordt op grond van het bovenstaande meteen ingezien dat de triodebuis oscillator eveneens een relaxatietrilling kan produceren als de condensator wordt weggenomen, om naar het idee van Van der Pol te worden opgevat als *parasitaire* bedradingscapaciteit [1e].

3.2 Hysterese

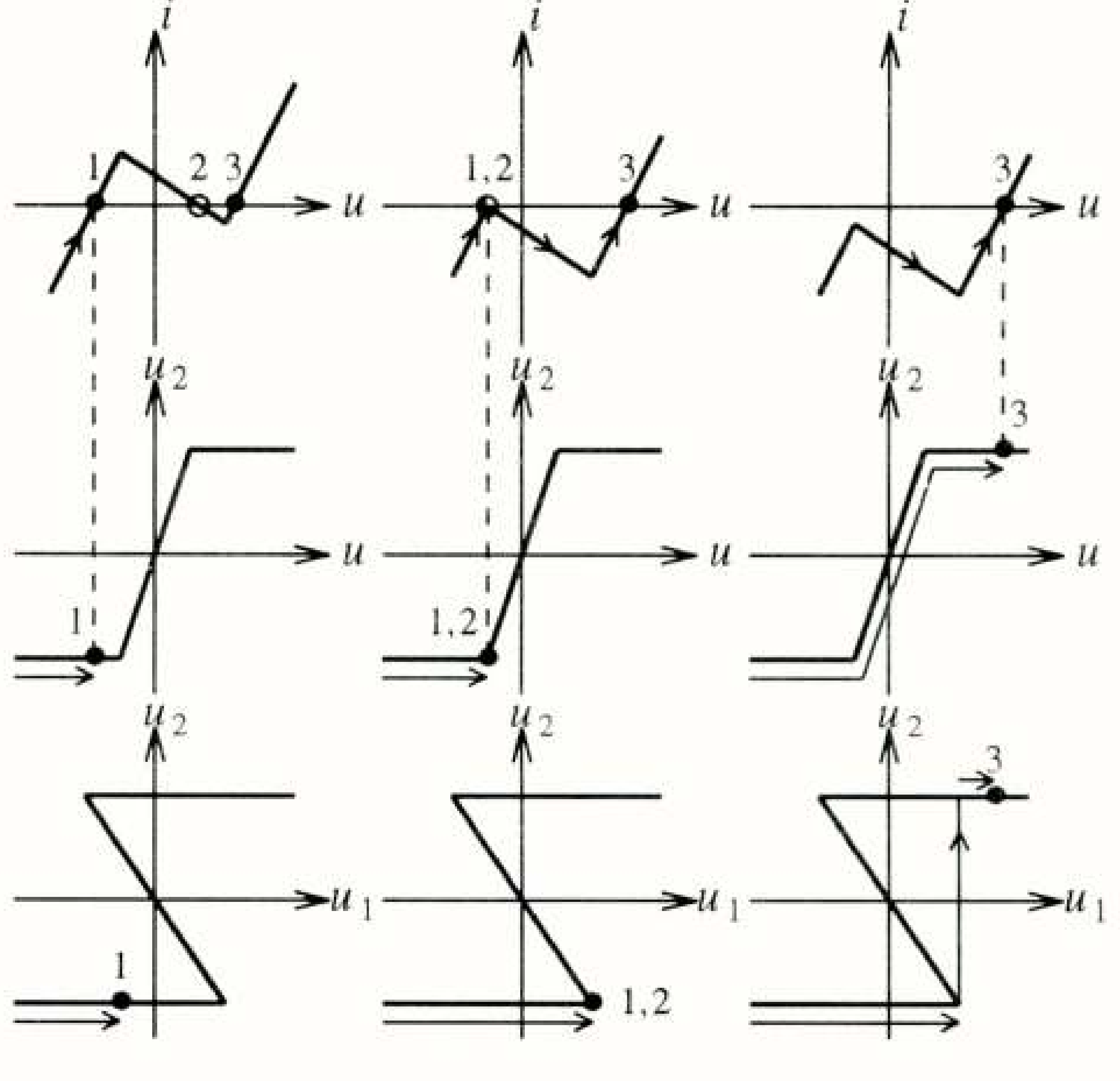
In figuur 11 wordt een *Schmitt-trigger* gerealiseerd met een meegekoppelde op-amp met verzadiging.



Figuur 11. De extra parasitaire capaciteit C verklaart de hysterese van de Schmitt-trigger als een niet-lineair dynamisch verschijnsel.

Zonder de gestippeld weergegeven capaciteit is het circuit van figuur 11 zuiver resistief, en kan derhalve onmogelijk abrupte sprongen vertonen als $u_1 = u_1(t)$ daar vrij van is. De *hysterese* van de materiële Schmitt-trigger blijft daarmee echter geheel onverklaard. Het dilemma wordt opgelost door de capaciteit *C* als *parasiet* aan het niet-lineaire op-amp model toe te voegen, waarna de hysterese als een *niet-lineair dynamisch* verschijnsel kan worden uitgelegd [24].

Figuur 12 geeft een overzicht voor toenemende waarden van de ingangsspanning u_1, startend bij een negatieve waarde (op-amp in negatieve verzadiging; punt 1 in de figuur). Aangenomen is dat u_1 veel langzamer verandert dan de interne dynamica langs de *u-i*-karakteristiek die de parasiet *C* 'ziet'. Vanaf een kritische waarde van u_1 (punt 1,2) wordt de u_2-versus-*u* karakteristiek in hoog tempo doorlopen, waarna de op-amp in positieve verzadiging geraakt (punt 3). Alleen in het u_2-u_1-vlak manifesteert de overgang zich als een sprong. Wegens de kleine waarde van *C* is de omklaptijd weliswaar klein, maar *niet* gelijk aan nul en bovendien gemakkelijk af te schatten [24].

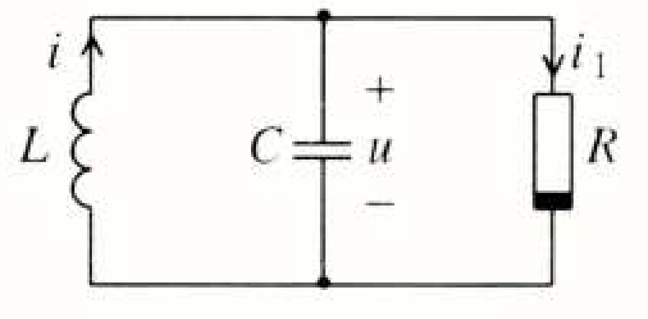


Figuur 12. De hysterese van de Smitt-trigger als niet-lineair dynamisch verschijnsel in kaart gebracht.

4. NIET-LINEAIRE DYNAMICA IN TOESTANDSRUIMTE

4.1 Toestandsvergelijkingen

Het *autonome*, niet-lineaire dynamische circuit van figuur 13 is van de *orde twee* (twee dynamische elementen). De *u-i*-relatie van de weerstand is gegeven als $i_1 = \bar{i}(u)$. De stroom $i = i(t)$ door de inductiviteit en de spanning $u = u(t)$ over de capaciteit worden elk opgevat als een *toestandsvariabele*. Tezamen bepalen zij de opgeslagen elektromagnetische energie, en daarmee de *toestand* van het circuit ten tijde *t*.



Figuur 13. De toestandsvariabelen zijn i en u.

Vanaf een gegeven *begintoestand* (i_0, u_0) op het begintijdstip t_0 wordt de evolutie van de toestand beschreven door de circuit vergelijkingen

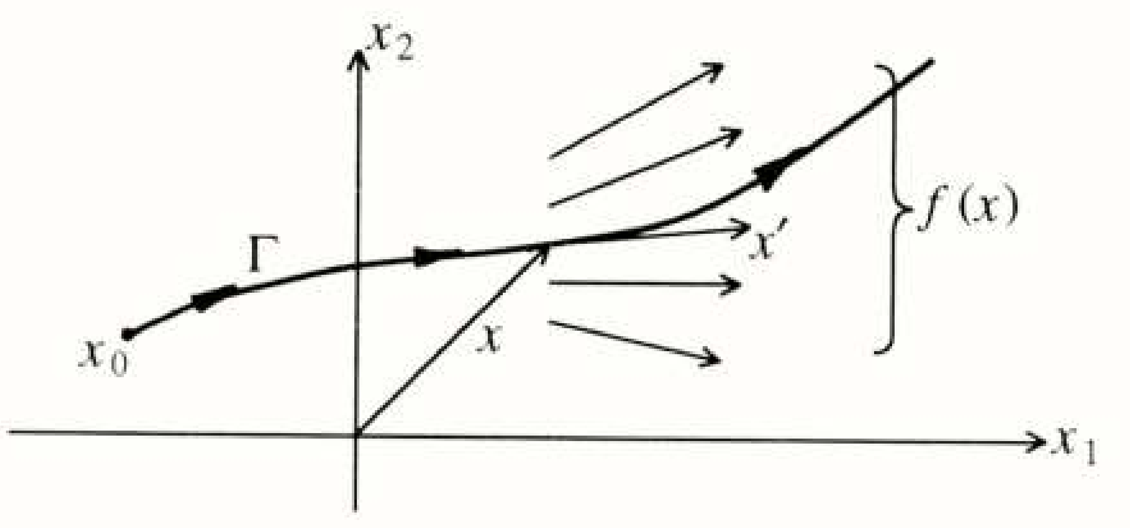
$$(4.1) \qquad \begin{cases} i' = \qquad\qquad -L^{-1}u & (a) \\ u' = C^{-1}i - C^{-1}\bar{i}(u) & (b) \end{cases}$$

of, in standaardvorm, door de niet-lineaire *autonome toestandsvergelijking*

(4.2) $x' = f(x)$ met $x(t_0) = x_0$.

Hierin is $x = x(t)$ met $x = (x_1, x_2) = (i, u)$ de onbekende *toestandsvector*, terwijl het accent staat voor een differentiatie naar de tijd. De vectorfunctie $f = (f_1, f_2)$ is gedefinieerd volgens het rechterlid van (4.1) en is derhalve voor elke toestand x bekend, terwijl de begintoestand x_0 eveneens bekend is.

À la Poincaré wordt x opgevat als de *positie* van een *bewegend* punt in de *toestandsruimte* (x_1, x_2). Dan is x' de *snelheid* van dat punt die met (4.2) juist gegeven is door $f(x)$. Op zijn beurt kan $f(x)$ op vaste punten worden weergegeven als een gegeven *snelheidsveld* (vectorveld). Volgens deze voorstelling manifesteert de oplossing $x = x(t)$ van (4.2) zich als een door de tijd gecoördineerde baankromme (een *trajectorie*) in de toestandsruimte, startend bij x_0 en *tangentieel* aan het snelheidsveld (met (4.2) is $dx_2/dx_1 = f_2/f_1$); zie figuur 14.



Figuur 14. Trajectorie Γ en snelheidsveld $f(x)$.

Voor verschillende begintoestanden produceert (4.2) een familie van trajectoriën in de toestandsruimte. Zo'n *toestandsbeeld* geeft een compleet overzicht van de *kwalitatieve* dynamica van het circuit. Kwalitatief, omdat alleen het globale verloop van x in de tijd kan worden gevolgd; kwantitatieve waarden van x op het tijdstip t kunnen er niet van worden afgeleid.

In het toestandsbeeld van *autonome* circuits kunnen de trajectoriën *elkaar niet snijden* ($f(x)$ heeft voor elke x precies één beeldpunt x'). In de praktijk wordt het toestandsbeeld verkregen door (4.2) voor een spectrum van begintoestanden *numeriek* te integreren.

4.2 Evenwichtspunten

Een punt $x = x_Q$ in de toestandsruimte is een *evenwichtspunt* (een dc-oplossing) als zijn snelheid gelijk is aan nul, dus $f(x_Q) = 0$ in (4.2). Inzicht in het *lokale gedrag* nabij x_Q wordt verkregen door een linearisering van (4.2) ter plaatse van x_Q toe te passen (het klein-signaal gedrag rondom het instelpunt). Voor een kleine afwijking x van x_Q leidt dit tot de lineaire, autonome toestandsvergelijking

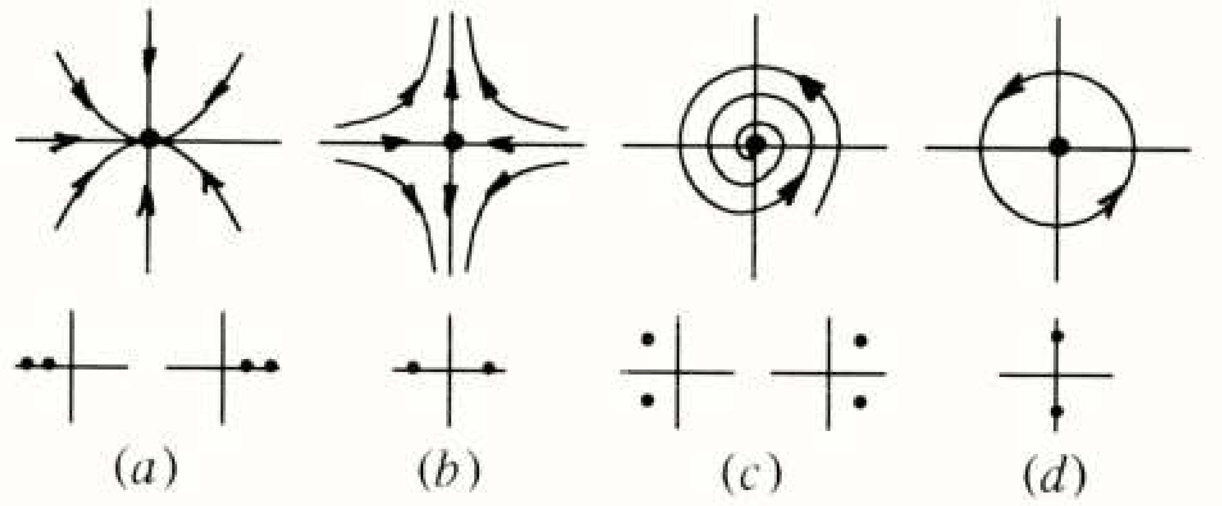
(4.3) $x' = Ax$,

waarin A de *Jacobi-matrix* is van $f(x)$ voor $x = x_Q$ (via een Taylor-ontwikkeling verkregen als de eerste afgeleide van f naar x). Oplossingen van (4.3) zijn lineaire combinaties van de exponentiële tijdfuncties $\exp(\lambda t)$, waarvan de *eigenwaarden* λ volgen uit de *karakteristieke vergelijking*

(4.4) $\det(A - \lambda I) = 0$

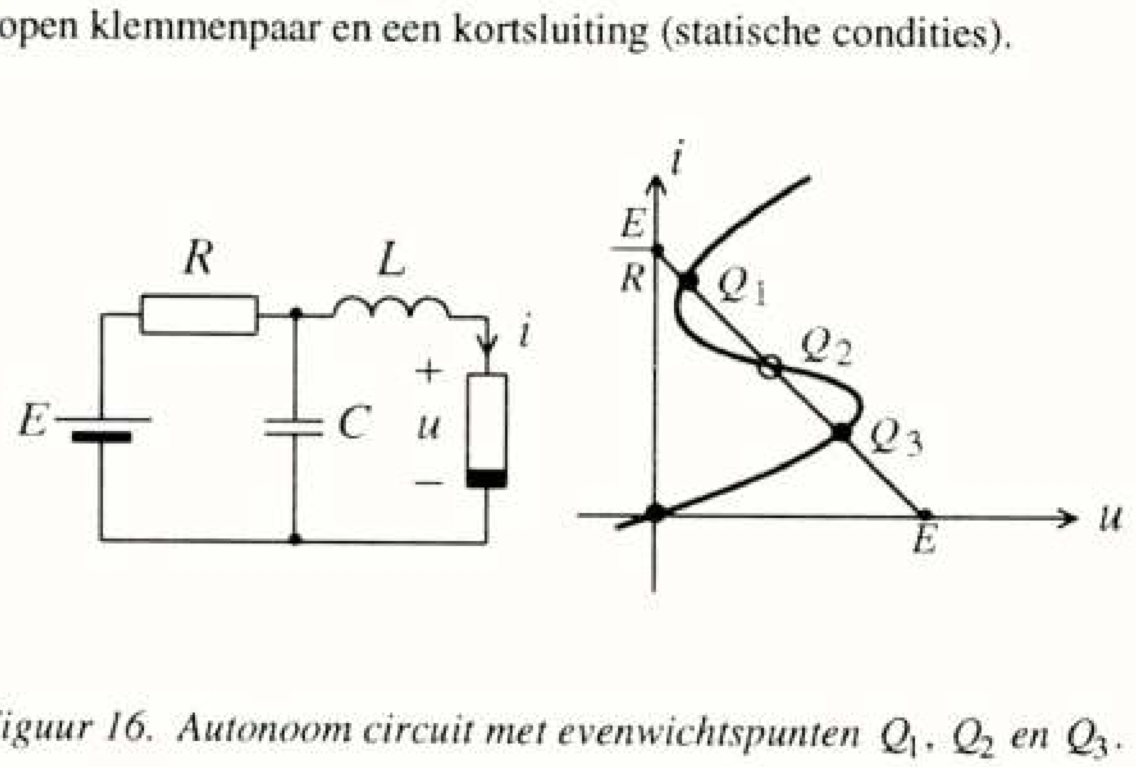
met I de eenheidsmatrix.

Een evenwichtspunt x_Q is *stabiel* indien $\mathrm{Re}(\lambda) < 0$ voor *alle* λ's, en is dan tevens een *positieve attractor* (punt van aantrekking). Als $\mathrm{Re}(\lambda) > 0$ voor *tenminste* één λ is x_Q *instabiel*. Indien $\mathrm{Re}(\lambda) > 0$ voor *alle* λ's is x_Q een *negatieve attractor*(punt van afstoting). Voorts kunnen er voor twee verschillende λ's vier mogelijkheden worden onderscheiden (classificatie volgens Poincaré): (a) de λ's zijn beide reëel met hetzelfde teken, (b) als (a) maar met verschillend teken, (c) ze zijn complex geconjugeerd met $\mathrm{Re}(\lambda) \neq 0$, (d) als (c) maar zuiver imaginair. De ermee corresponderende evenwichtspunten heten respectievelijk een *knoop-*, *zadel-*, *spiraal-* en *centrumpunt*. Figuur 15 geeft een overzicht van de lokale toestandsbeelden (van de knoop en het spiraalpunt zijn alleen de stabiele versies weergegeven). Zij worden verkregen door eerst een lokale assentransformatie toe te passen, en daarna de tijd uit de lineaire combinaties van de exponentiële tijdfuncties te elimineren.



Figuur 15. Knoop (a), zadel (b), spiraal (c) en centrum (d).

Anders dan het circuit van figuur 13, dat slechts één evenwichtspunt heeft (zie verderop), belooft het autonome circuit van figuur 16 er drie. Zij worden gevonden door de C en de L respectievelijk te vervangen door een open klemmenpaar en een kortsluiting (statische condities).



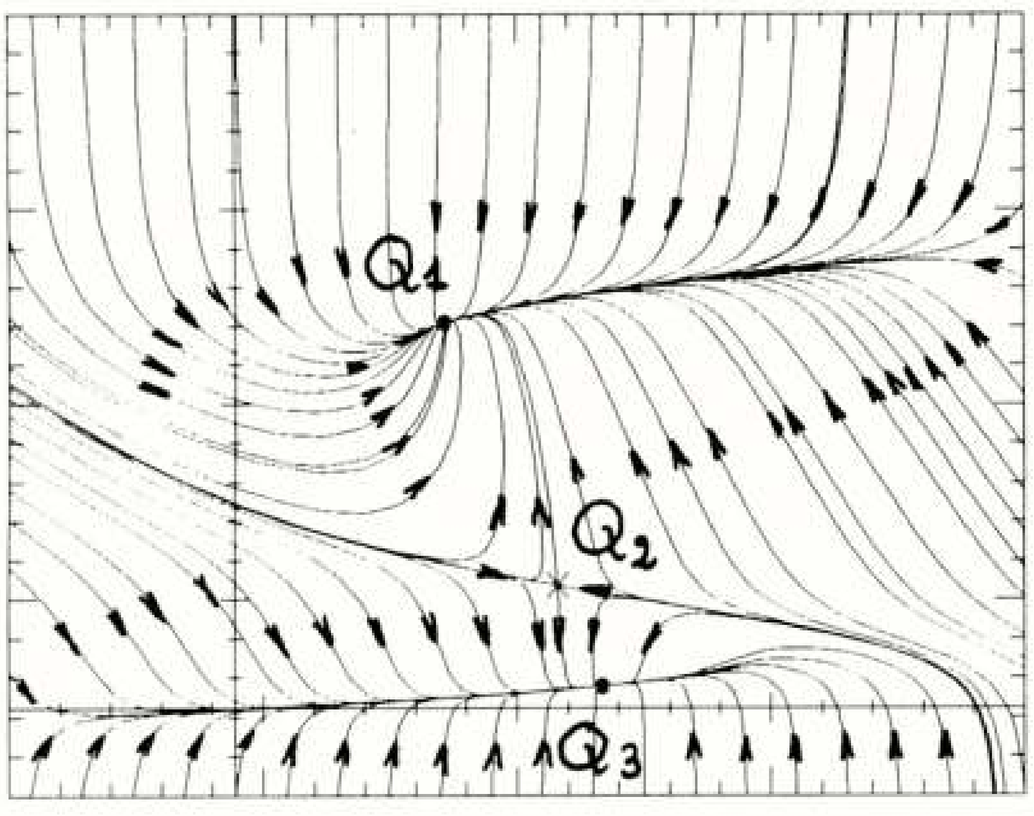
Figuur 16. Autonoom circuit met evenwichtspunten Q_1, Q_2 en Q_3.

In figuur 17 staat een computer-gesimuleerd toestandsbeeld. De figuur geeft in één oogopslag een compleet overzicht van de *globale* kwalitatieve dynamica van het circuit. Lokaal worden Q_1 en Q_3 herkend als stabiele knopen en Q_2 als zadel (een zadel is instabiel, en derhalve experimenteel niet waarneembaar). De door Q_2 aangetrokken trajectoriën delen de toestandsruimte op in twee gescheiden gebieden die elk een attractiepunt insluiten. Die gebieden zijn *attractiegebieden* met een *separatrice* als scheidslijn (in figuur 17 van linksmidden naar rechtsonder).

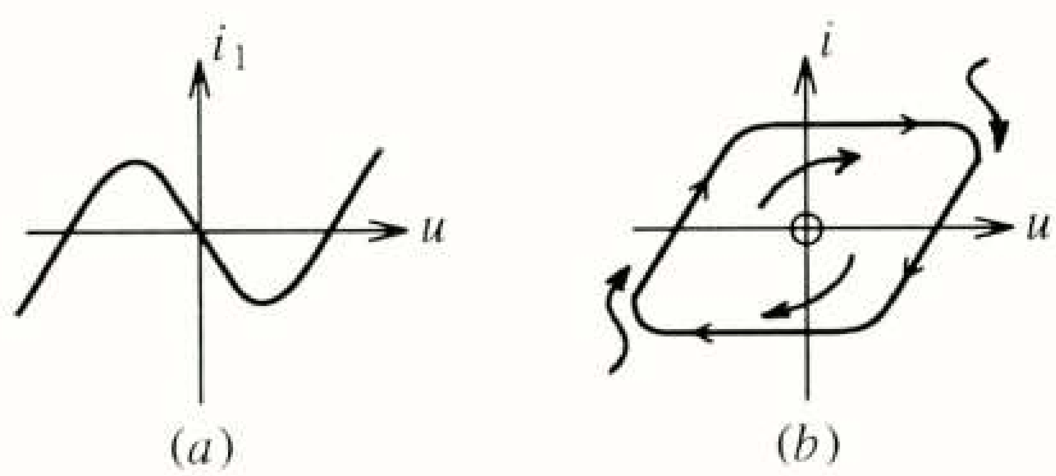
4.3 Limit-cycles

Figuur 18a specificeert de u-i-karakteristiek van de weerstand in het RLC-circuit van figuur 13.

Met (4.1) is de oorsprong van de toestandsruimte het enige evenwichtspunt dat volgens (4.4) bovendien instabiel blijkt. Dit laatste is ook direct in te zien als wordt bedacht dat de differentiaal resistantie ter plekke



Figuur 17. Toestandsbeeld van het circuit in figuur 16.



Figuur 18. Met u-i-karakteristiek (a) heeft het RLC-circuit van figuur 13 een limit-cycle (b).

negatief is. Ook voor andere lokaties in de toestandsruimte corresponderen punten met een negatieve of positieve differentiaal resistantie respectievelijk met expanderende of samentrekkende trajectoriën. En, omdat de trajectoriën elkaar niet kunnen snijden, is er rondom de instabiele oorsprong een *gesloten baan* waarnaar alle trajectoriën voor $t \to \infty$ convergeren (figuur 18b). Kennelijk is deze *limit-cycle* een *attractor* met de gehele toestandsruimte, uitgezonderd de oorsprong, als attractiegebied. Startend vanuit een willekeurige begintoestand, ontstaat er na enige aanlooptijd steeds een *periodieke trilling*.

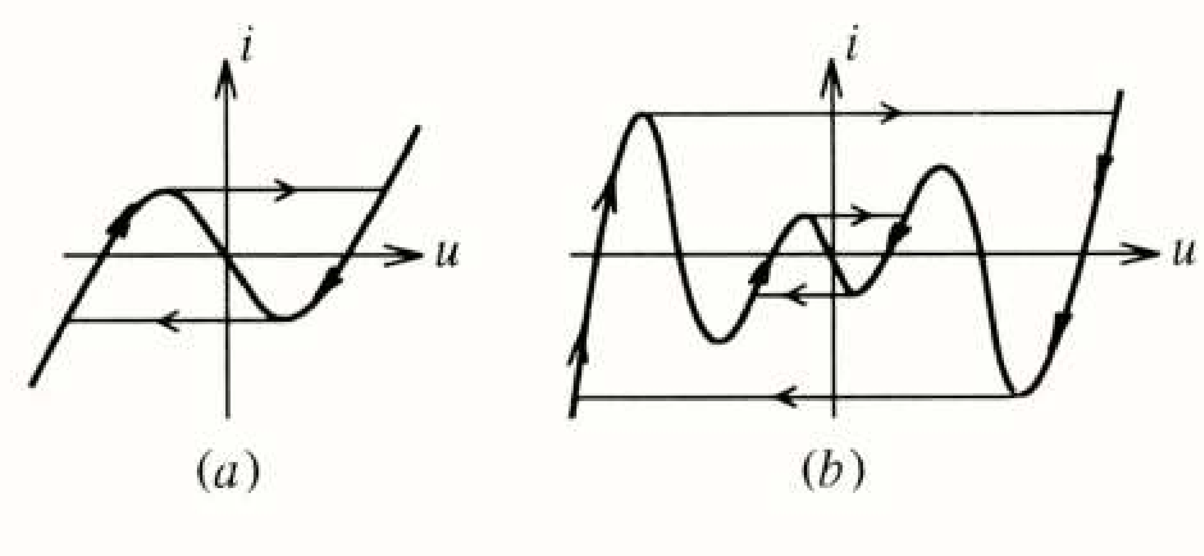
Het zojuist besproken circuit modelleert de eerder genoemde triodebuis-oscillator (de autonome *Van der Pol oscillator*) als de *u-i*-karakteristiek van figuur 18 in navolging van Van der Pol wordt gepreciseerd door $i_1 = \tilde{i}(u) \equiv -u + \frac{1}{3}u^3$ (invloed van meegekoppelde triodebuis op *LC*-parallelkring). Substitutie van (4.1a) in de naar de tijd gedifferentieerde vergelijking (4.1b), voert dan vanzelf tot de *autonome Van der Pol-vergelijking*

(4.5) $$u'' + \varepsilon(u^2 - 1)u' + u = 0 \quad \text{met} \quad \varepsilon = \sqrt{L/C}$$

(*RLC*-parallelkring),

waarin intussen is overgegaan op de nieuwe tijdvariabele $\tau = \omega_0 t$, met $\omega_0^2 = (LC)^{-1}$.

Voor $\varepsilon << 1$ kan de middelste term in (4.5) (de *niet-lineaire dempingsterm*) worden verwaarloosd, resulterend in een ongedempte *harmonische trilling*, en waarmee een *elliptische limit-cycle* correspondeert. Het andere uiterste $\varepsilon >> 1$ heeft betrekking op een niet-lineaire *RLC*-parallelkring met kleine capaciteit, en waarvoor eerder werd betoogd dat het een *relaxatietrilling* uitvoert. Voor alsmaar toenemende waarden van ε (kleinere capaciteiten) tendeert de *limit-cycle* uiteindelijk naar de *dynamische route* van het circuit zonder capaciteit (figuur 19a).



Figuur 19. Limit-cycles voor $\varepsilon \to \infty$.

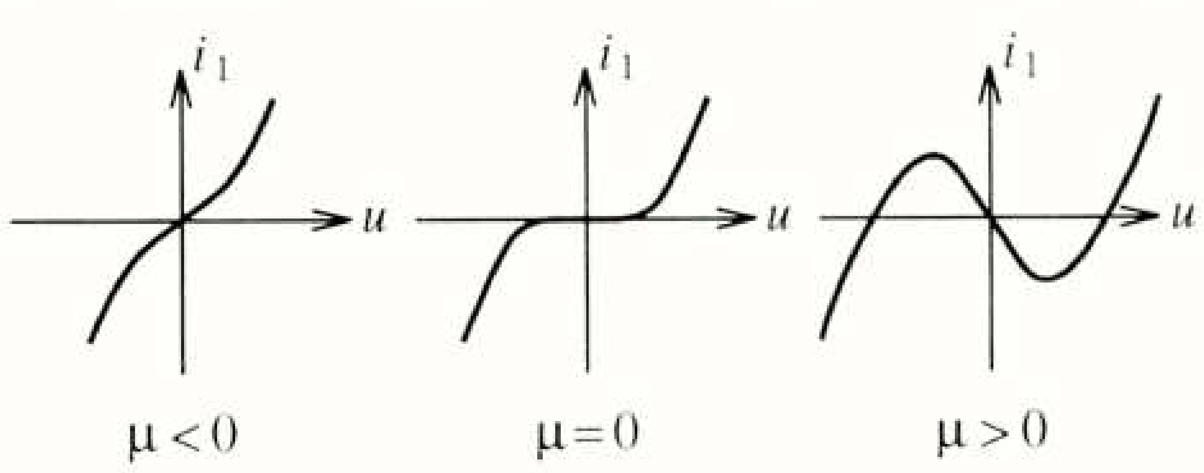
Nu is ook duidelijk dat het autonome *RLC*-circuit *meerdere* limit-cycles kan hebben, zie figuur 19b. Naar welke limit-cycle de trajectoriën worden aangezogen, hangt af van de *begintoestand*.

Limit-cycles kunnen alléén optreden in *niet-lineaire* dynamische circuits (N.B. Het centrumpunt van figuur 15 is géén limit-cycle.) Naast evenwichtspunten zijn limit-cycles de *enige* attractors in *autonome* circuits van de *orde twee* (onmiddellijk gevolg van de omstandigheid dat de trajectoriën in de twee-dimensionale toestandsruimte elkaar niet snijden). Historisch gaat het begrip limit-cycle terug tot H. Poincaré [25]. Voor Lord Rayleigh (eerder door het leven gaand als J.W. Strutt) was het een vanzelfsprekend concept in zijn studie van geluidstrillingen [26]. Het was B. van der Pol die limit-cycles voor het eerst productief associeerde met elektronische oscillators [1d]. Nadien is het toestandsconcept bij de behandeling van oscillators enigszins uit beeld geraakt. In plaats daarvan ziet men beschouwingen in het frequentie-domein die niet uitblinken door hun conceptuele helderheid (criterium van Barkhausen). Met de huidige opmars van computers kunnen berekeningen in de toestandsruimte steeds beter concurreren met die in het frequentie-domein [27].

4.4 Structurele stabiliteit

Het dynamische gedrag van een *structureel stabiel* circuit blijft in essentie ongewijzigd bij kleine veranderingen van de *circuit-parameters*. Het niet-lineaire *RLC*-circuit van hierboven staat model. Daarbij is de precieze vorm van de *u-i*-karakteristiek in figuur 18a van ondergeschikt belang. Zolang de *globale* vorm maar behouden blijft, genereert het circuit steeds een periodieke trilling (limit-cycle).

In figuur 20 worden de *kwalitatieve* eigenschappen van de toegepaste weerstand in het *RLC*-circuit afhankelijk gesteld van de parameter μ. Toenemende waarden van μ moeten een continue overgang van een passieve naar een actieve weerstand verbeelden (bijvoorbeeld teweeggebracht door het geleidelijk opvoeren van een interne batterijspanning).



Figuur 20. Geparameteriseerde u-i-karakteristiek.

Voor $\mu < 0$ is het evenwichtspunt in de toestandsruimte *stabiel* (gedempte trillingen) en voor $\mu > 0$ *instabiel*. De waarde $\mu = 0$ correspondeert met een *centrumpunt* (*harmonische oscillator*). Bij een geleidelijke toename van μ ondergaat het evenwichtspunt naar men zegt een *bifurcatie* (vertakking), gepaard gaande met de creatie van een limit-

cycle. Deze drastische gedragsverandering is typerend voor een *Hopf-bifurcatie*. Het *RLC*-circuit is *structureel instabiel* onder de *bifurcatie-parameter* μ; het *bifurcatiepunt* treedt op bij $\mu = 0$.

De Schmitt-trigger van hiervoor manifesteert een ander type bifurcatie. Bij toenemende ingangsspanning u_1 gaat een stabiele knoop eerst samenvallen met een instabiele, uitmondend in een zadel, om daarna abrupt te verdwijnen (zie de dynamische route van figuur 12). Dit is een *zadel-knoop bifurcatie* met u_1 als bifurcatie-parameter (zie verderop voor meer).

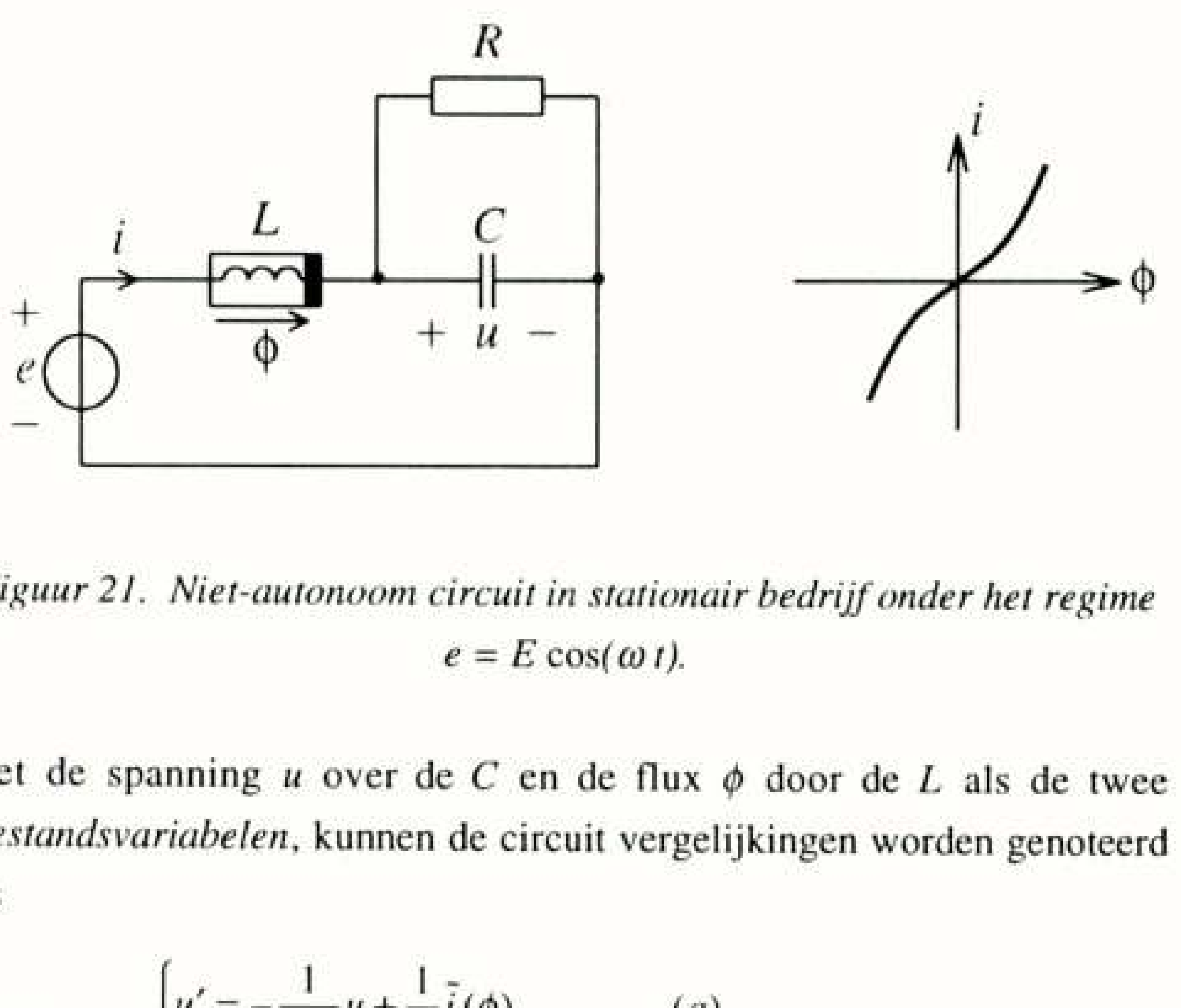
5. NIET-AUTONOME CIRCUITS

Het stationaire gedrag van autonome circuits van de orde twee is beperkt tot evenwichtspunten en periodieke trillingen. Voor meer complex gedrag zijn *drie vrijheidsgraden* nodig. Zulke circuits zijn ofwel *niet-autonoom* en van de orde *twee*, ofwel *autonoom* en van de orde *drie*. Het zijn de *eenvoudigste* circuits waar zogenaamde *chaotische*, zeer complexe trillingsverschijnselen kunnen worden verwacht.

Anders dan lineaire circuits, kunnen *niet-lineaire* circuits ook *super-* en *subharmonische* trillingen genereren. Zelfs *quasi-periodieke* trillingen vallen binnen de klassieke context (pre-chaos periode). Hieronder worden deze trillingsverschijnselen als *toestandsgedrag* opgevat.

5.1 Subharmonische trillingen

Het niet-autonome *RLC*-circuit van figuur 21 is van de orde twee. Het staat onder *harmonisch regime* met frequentie ω en verkeert in *stationair bedrijf*.



Figuur 21. Niet-autonoom circuit in stationair bedrijf onder het regime $e = E\cos(\omega t)$.

Met de spanning u over de C en de flux ϕ door de L als de twee *toestandsvariabelen*, kunnen de circuit vergelijkingen worden genoteerd als

$$(5.1)\qquad \begin{cases} u' = -\dfrac{1}{RC}u + \dfrac{1}{C}\bar{i}(\phi) & (a) \\ \phi' = \quad -u \qquad\qquad +e & (b) \end{cases}$$

waarin $\bar{i}(\phi)$ de flux-bestuurde voorstelling van de inductiviteit is, terwijl $e = E\cos(\omega t)$. In standaardvorm laat (5.1) zich lezen als de niet-lineaire, *niet-autonome toestandsvergelijking*

$$(5.2)\qquad x' = f(x,t) \quad \text{met} \quad x(t_0) = x_0 \ .$$

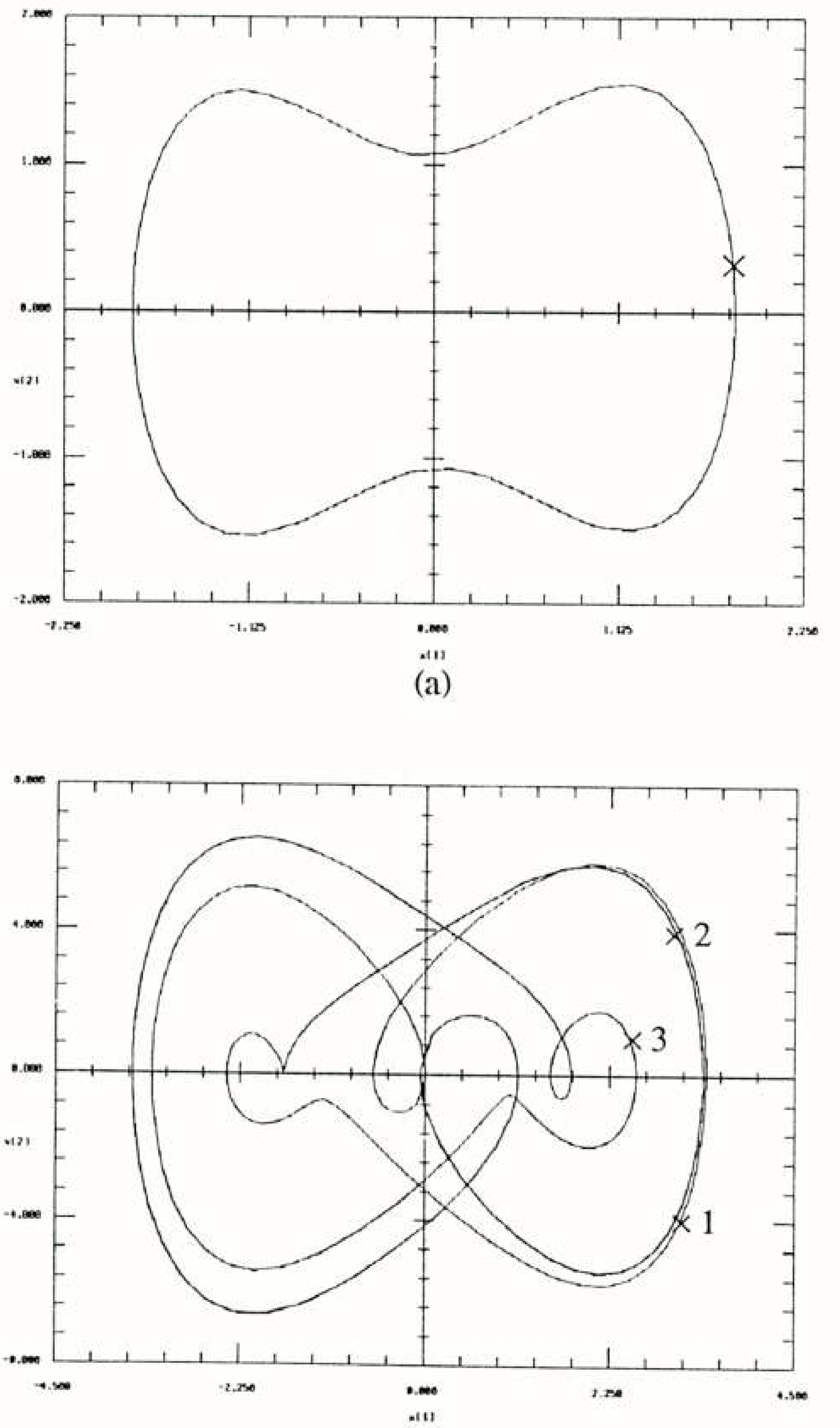
Anders dan in de autonome variant (4.2), komt de tijd t via $e = e(t)$ nu *expliciet* voor. Het onmiddellijke gevolg is dat de trajectoriën in de twee-dimensionale toestandsruimte *elkaar kunnen snijden* (er is immers niets dat zich verzet tegen $f(x, t_1) \neq f(y, t_2)$ voor $x = y$).

Eliminatie van u uit (5.1) geeft na enige herleiding

$$(5.3)\qquad \phi'' + k\phi' + \alpha\ \bar{i}(\phi) = B\cos\tau \ ,$$

waarin is overgegaan op de nieuwe tijdvariabele $\tau = (\omega t - \operatorname{arctg} k)$ met $k = (\omega RC)^{-1}$, terwijl $\alpha = kR/\omega$ en $B^2 = (E/\omega)^2(1+k^2)$.

Naar algemeen wordt aangenomen heeft G. Duffing de eigenschappen van deze niet-lineaire differentiaal vergelijking voor het eerst bestudeerd (in de context van mechanische trillingen [28]). Met $\alpha\ \bar{i}(\phi) = a\phi + b\phi^3$ heet (5.3) de *niet-autonome vergelijking van Duffing*. Daarvan is bekend dat er subharmonische oplossingen mogelijk zijn. (Met ω als opgelegde frequentie heeft de *k-de subharmonische* de grondfrequentie ω/k (k = 2, 3, ...). Figuur 22 toont computer-gesimuleerde resultaten (de kruisjes worden later toegelicht). Superharmonische trillingen (met frequentie $k\omega$) leveren in dit verband geen nieuwe gezichtspunten op, en worden derhalve overgeslagen.



Figuur 22. Stationaire oplossing van de Duffing-vergelijking $\phi'' + 0.1\phi' + \phi^3 = B\cos\tau$ met $x[1] = \phi$ en $x[2] = \phi'$ als toestandsvariabelen. Grondharmonische met $B = 2$ (a) en 3-de subharmonische met $B = 9{,}8$ (b).

Het niet-lineaire *RLC*-circuit van figuur 21 modelleert een serieverbinding van een *condensator* en een *spoel* met ijzerkern. Naast anderen, hebben G.J. Elias en medewerkers dit circuit in de tweede helft van de jaren veertig intensief bestudeerd [2]. Bij de theoretische behandeling bracht Elias de (geringe) circuitverliezen echter niet zoals in figuur 21 via een (grote) parallelweerstand in rekening, maar middels een (kleine) serieweerstand. Ter vereenvoudiging van de niet-lineaire analyse werd de verliesweerstand in een later stadium evenwel weer verwaarloosd, aldus uitkomend bij de *dempingsvrije vergelijking van Duffing* ($R \to \infty$ in figuur 21; $k = 0$ in (5.3)). (N.B. Uit [2] blijkt niet dat Elias op de hoogte was van Duffing's werk.) Centraal thema in het werk van Elias is het onderzoek naar subharmonischen, steeds in hun afhankelijkheid van de bronsterkte E (figuur 21). Vooral is aandacht besteed aan het plotseling springen (het 'kipverschijnsel' van Elias) van het circuitgedrag bij zekere kritische waarden van de parameter E (de 'kipgrenzen' van Elias). De nauwgezette beschrijving die Elias van de gecompliceerde trillingsverschijnselen gaf, passen in het verderop te behandelen concept van een bifurcatie-diagram. Dan zal ook blijken dat het optreden van subharmonische trillingen een belangrijke aanwijzing is voor mogelijk chaotisch gedrag.

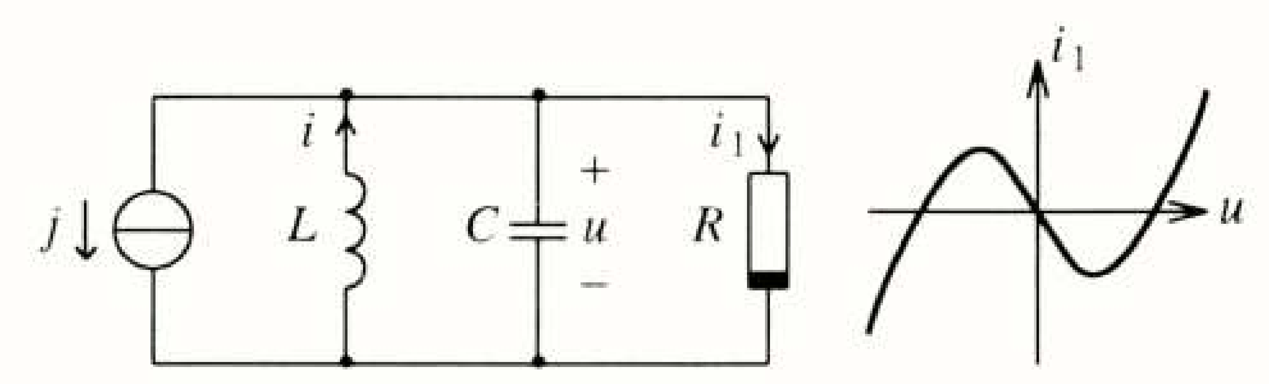
5.2 Quasi-periodieke trillingen

De lineaire combinatie van harmonischen

(5.4) $$x = A\cos(\omega_1 t) + B\cos(\omega_2 t)$$

is *quasi-periodiek* als ω_1 en ω_2 *onmeetbaar* zijn, d.w.z. $\omega_1/\omega_2 \neq p/q$ met p en q rationaal. Juist het ontbreken van een gemeenschappelijke periode maakt de trilling aperiodiek. Het frequentie-spectrum is evenwel *discreet*. Op het chaotische signaal na, is het de meest onregelmatige trilling die een deterministisch model kan opwekken.

In figuur 23 staat een niet-lineair, niet-autonoom dynamisch circuit dat quasi-periodieke trillingen kan uitvoeren. Met $i_1 = -u + \frac{1}{3}u^3$ modelleert het de *gedwongen Van der Pol oscillator*.



Figuur 23. Gedwongen Van der Pol oscillator met $j = J\cos(\omega t)$.

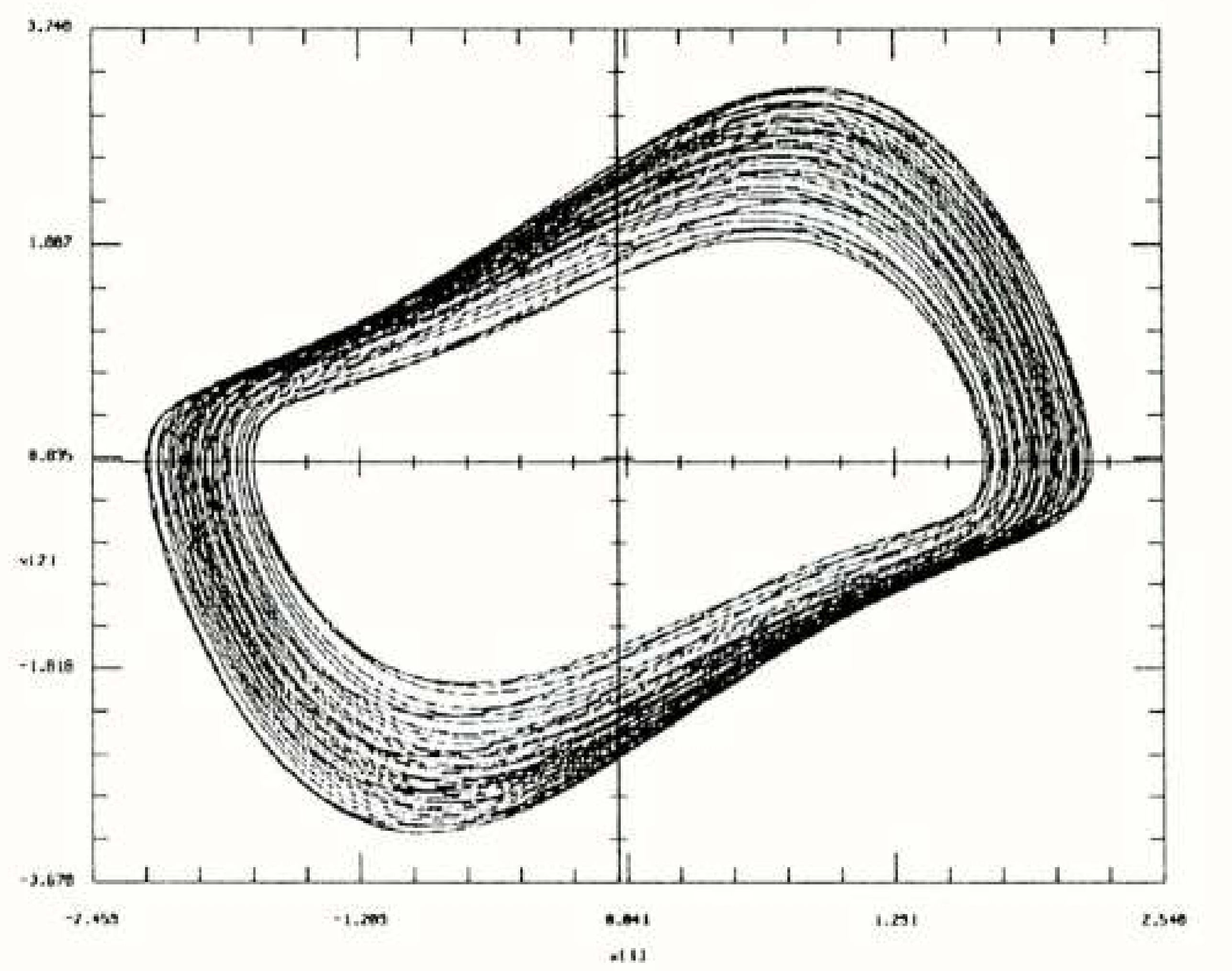
Geheel analoog aan de eerdere afleiding van (4.5) wordt de *niet-autonome Van der Pol-vergelijking* verkregen als

(5.5) $$u'' + \varepsilon(u^2 - 1)u' + u = B\sin(\nu\tau) \quad ,$$

waarin de notatie van (4.5) is aangehouden, terwijl $B = \varepsilon\nu J$ met $\nu = \omega/\omega_0$.

Waar de niet-lineaire term in de vergelijking van Duffing (5.3) afkomstig is van een dynamisch element (reactieve energie), brengt de Van der Pol vergelijking een niet-lineaire dempingsterm in rekening (resistieve energie).

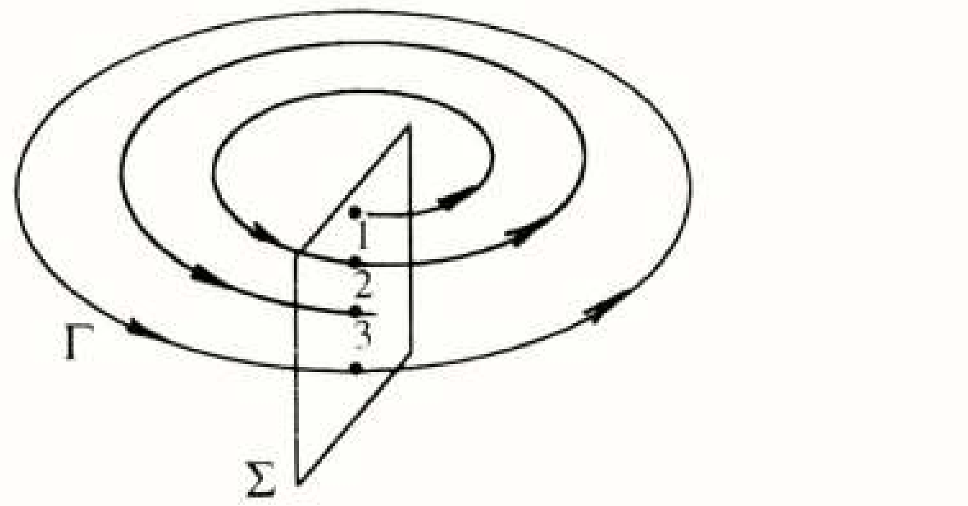
De stationaire oplossingen van (5.5) worden bepaald door *twee* periodieke trillingen: de opgelegde brontrilling en de limit-cycle trilling (vrije trilling). De *niet-lineaire* interactie tussen beide belooft intrigerende uitkomsten. En inderdaad, zelfs chaotische oplossingen blijken, althans in theorie, inbegrepen (zie verderop). Als de frequenties van beide trillingen niet te veel verschillen, *synchroniseren* zij spontaan tot een gemeenschappelijke periodieke trilling (dit niet-lineaire verschijnsel werd voor het eerst opgemerkt door Christiaan Huygens). Ook andere niet-lineaire interacties voeren tot periodieke oplossingen. Als de frequenties ver genoeg uit elkaar liggen en bovendien onmeetbaar zijn, kan quasi-periodiek gedrag worden verwacht. De rozet van figuur 24 toont een computer-gesimuleerd voorbeeld.



Figuur 24. Quasi-periodieke oplossing van de Van der Pol-vergelijking. $u'' + \varepsilon(1 - u^2)u' + u = B\sin(\nu\tau)$ met $x[1] = u$ en $x[2] = u'$ als toestandsvariabelen ($\varepsilon = 1$, $B = 0{,}5$, $\nu = 1{,}1$).

5.3 Poincaré-doorsnede

In de $n = 3$-dimensionale autonome toestandsruimte van figuur 25 is het $(n-1) = 2$-dimensionale dwarsvlak Σ een *Poincaré-doorsnede*. (N.B. In een *autonome* toestandsruimte kunnen de trajectoriën elkaar niet snijden.)



Figuur 25. Poincaré-doorsnede Σ in toestandsruimte met limit-cycle Γ.

Trajectoriën nabij de limit-cycle Γ snijden Σ achtereenvolgens in de punten x_1, x_2, enz. De relatie tussen twee opeenvolgende passagepunten x_k en x_{k+1} kan worden genoteerd als

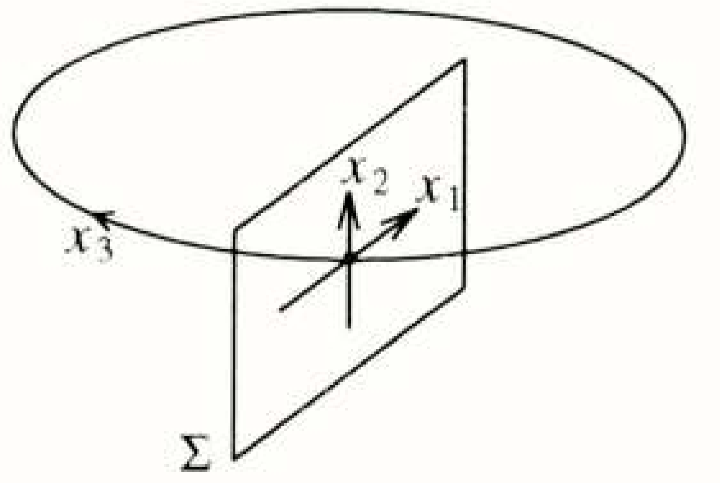
(5.6) $$x_{k+1} = P(x_k) \quad ,$$

waarin P de *Poincaré-afbeelding* op Σ heet. Met (5.6) wordt de n-dimensionale dynamica gecomprimeerd tot de $(n-1)$-dimensionale *discrete dynamica* in Σ. Daarbij wordt de *periodieke* attractor Γ afgebeeld als een enkel *attractiepunt* x^* in Σ. Met betrekking tot de discrete dynamica (5.6) is x^* een *evenwichtspunt*, waarvoor geldt $x^* = P(x^*)$.

De Poincaré-doorsnede vindt een elegante toepassing bij het *ontrafelen* van de *stationaire* dynamica van *niet-autonome* circuits onder *periodiek regime* (snijdende trajectoriën). Dit wordt ingezien als de $n = 2$-dimensionale niet-autonome toestandsvergelijking $x' = f(x,t)$ via een kunstgreep eerst *autonoom* wordt gemaakt middels de substitutie $t = x_3$, en te schrijven (vergelijk (5.2))

$$(5.7)\quad \begin{cases} x' = f(x,x_3) & \text{met} \quad x(t_0) = x_0 \\ x_3' = 1 & \text{met} \quad x_3(t_0) = t_0 \end{cases} \Leftrightarrow y' = g(y) \quad \text{met} \quad y(t_0) = y_0 \,.$$

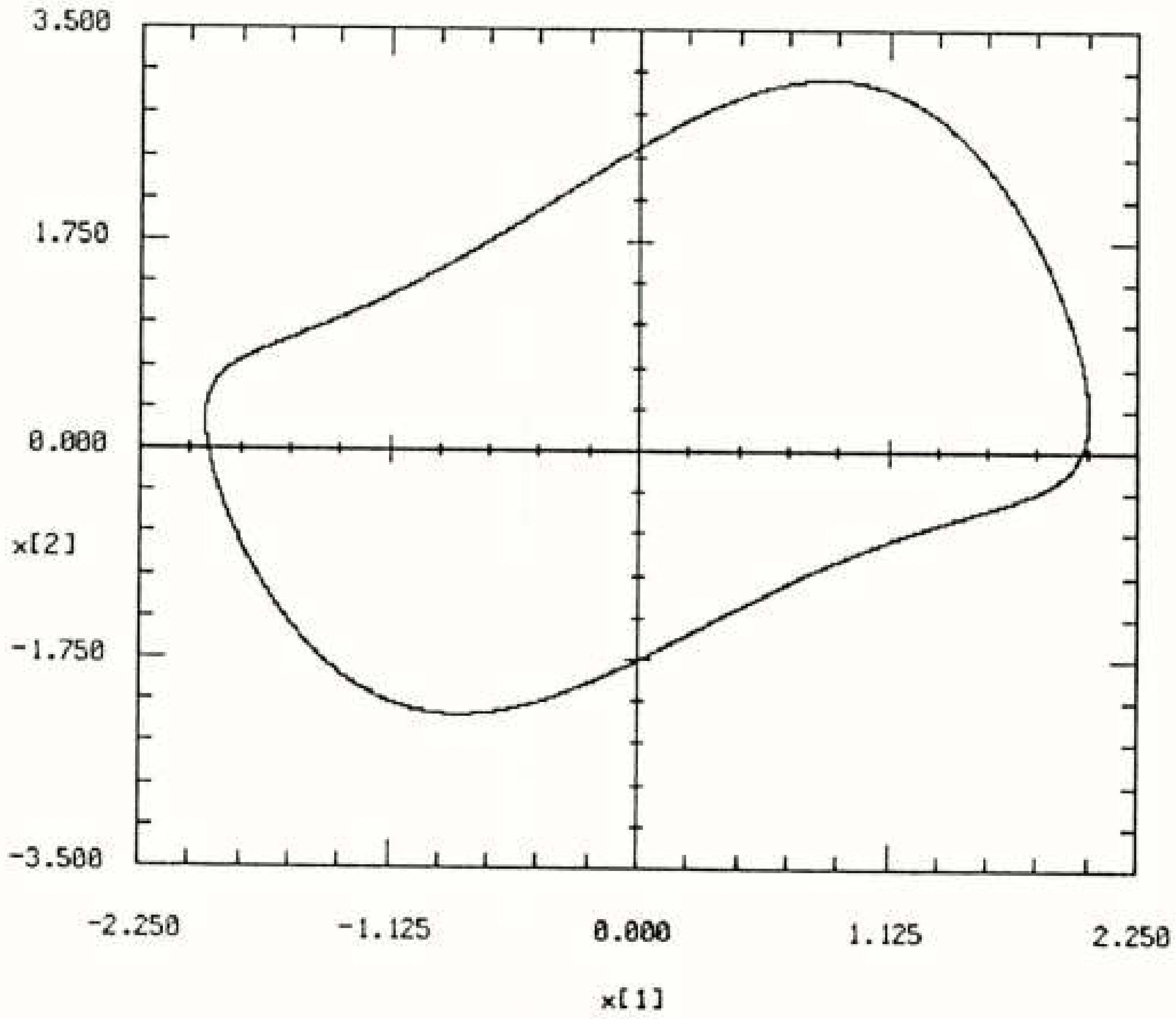
Hierin is $y = (x, x_3)$ de toestandsvector in de $(n + 1) = 3$-dimensionale toestandsruimte (x, x_3). Daar de tijd t in $f(x,t)$ terecht is gekomen via een T-periodieke bronterm, verandert de autonome toestandsvergelijking $y' = g(y)$ niet als daarin x_3 wordt vervangen door $x_3 + kT$ $(k = 1, 2, \ldots)$. Van deze eigenschap wordt vervolgens gebruik gemaakt door het vlak $x_3 = 0$ in de toestandsruimte (x, x_3) te *identificeren* met de vlakken $x_3 = kT$. Tenslotte wordt dit $(n+1)-1 = 2$-dimensionale vlak Σ als Poincaré-doorsnede opgevat (figuur 26).



Figuur 26. Nieuwe toestandsruimte voor niet-autonome circuits onder T-periodiek regime. Het vlak Σ: $x_3 = kT$ ($k = 0, 1, 2, \ldots$) is een Poincaré-doorsnede.

In de nieuwe toestandsruimte van figuur 26, geassocieerd met de *autonome* toestandsvergelijking $y' = g(y)$, kunnen de trajectoriën *elkaar niet snijden*. Volgens deze opzet, speelt een *stationaire* T-periodieke trajectorie dezelfde rol als de limit-cycle Γ van hierboven (T is de grondperiode van de bron)! Dus, een stationaire *T-periodieke oplossing* van de niet-autonome toestandsvergelijking manifesteert zich als een enkel *attractiepunt* in Σ. Een k-de *subharmonische* (met periode kT) correspondeert met k *verschillende* attractiepunten (waarvoor $x^* = P(P(\ldots P(x^*)))$: k achtereenvolgende malen de Poincaré-afbeelding (5.6)). Door in de oorspronkelijke toestandsruimte T-periodieke snapshots te nemen, kunnen de attractiepunten bovendien gemakkelijk *zichtbaar* worden gemaakt. De kruisjes in figuur 22 illustreren deze *stroboscopische* interpretatie.

Een stationaire, *quasi-periodieke* trajectorie snijdt Σ bij herhaalde rondgang in steeds *verschillende* punten (de éne periode past niet op de ándere). Naarmate de tijd verstrijkt, tekent zich in het stroboscopische beeld op den duur een *gesloten curve* af. (N.B. De irrationale verhouding tussen beide perioden wordt met willekeurige precisie benaderd door een wèl rationaal getal, b.v. $\pi \simeq 3{,}14 = 157/50$: uiteindelijk komt een trajectorie willekeurig dicht bij een punt dat al eerder was gepasseerd.) Hiermee onderscheidt deze *quasi-periodieke attractor* zich duidelijk van de *puntattractor* voor *periodieke* trillingen. Figuur 27 toont een quasi-periodieke attractor van de gedwongen Van der Pol oscillator (vergelijk figuur 24). Na te zijn rondgewenteld langs de x_3-coördinaat van figuur 26, ontstaat een *torus* met de aangegeven doorsnede. Daarom heet de quasi-periodieke attractor wel een *torus attractor*.



Figuur 27. Quasi-periodieke attractor van de gedwongen Van der Pol oscillator. Parameters als in figuur 24.

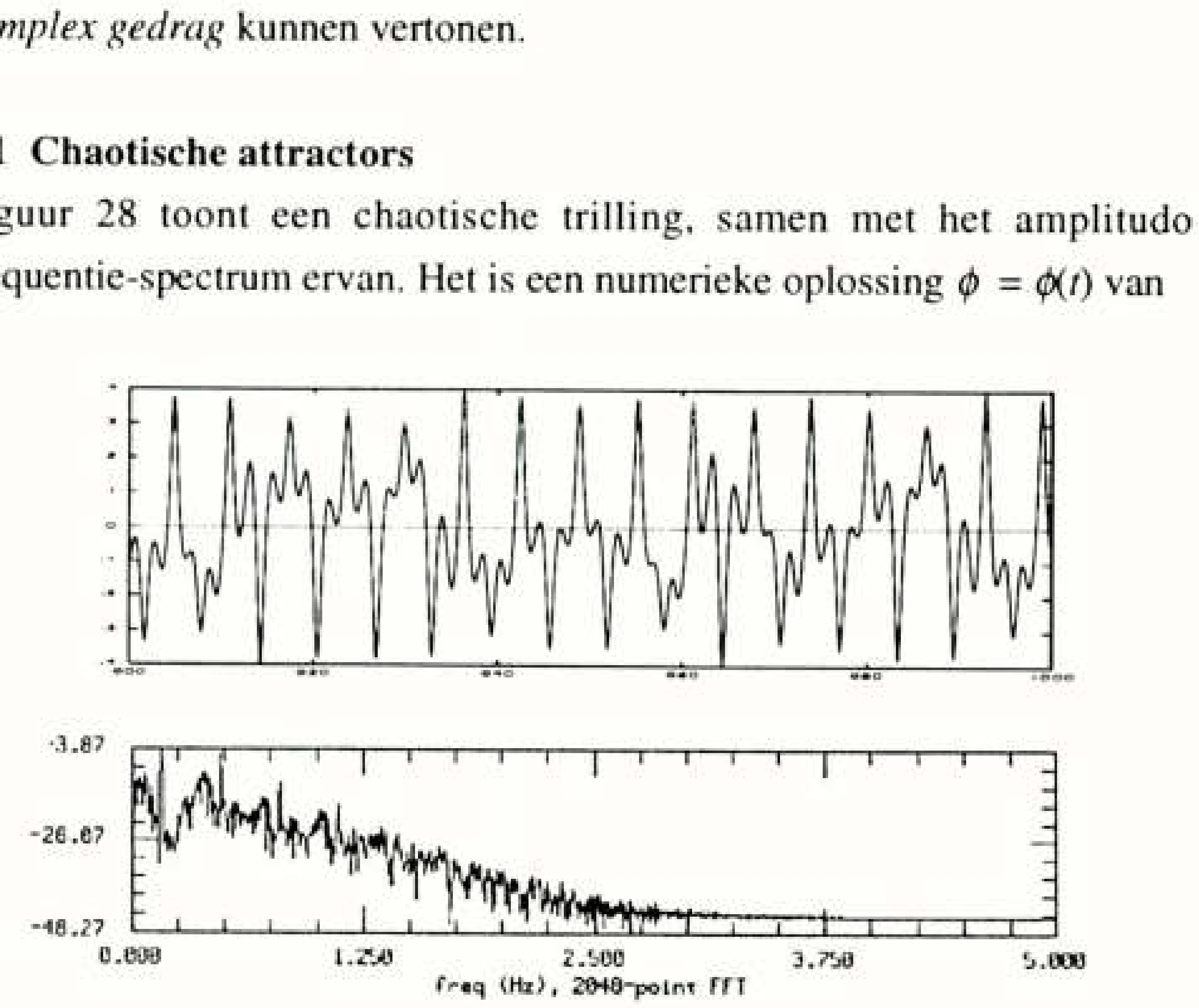
Na deze voorproef is het al duidelijk dat de Poincaré-doorsnede een effectief instrument is ter *classificatie* van niet-lineaire trillingsverschijnselen.

6. CHAOTISCHE TRILLINGEN

Tot op heden is er geen algemeen aanvaarde definitie van een aanhoudende chaotische trilling. Wel is duidelijk dat het een begrensde, *aperiodieke* doch niet quasi-periodieke trilling betreft. In tegenstelling tot de laatste, hebben chaotische trillingen een *continu frequentie-spectrum*. Anderzijds onderscheiden zulke trillingen zich van complete willekeur doordat de Poincaré-doorsnede een *geordende structuur* vertoont. Maar wat vooral verbaast, is dat zelfs *zeer eenvoudige circuits* een *zeer complex gedrag* kunnen vertonen.

6.1 Chaotische attractors

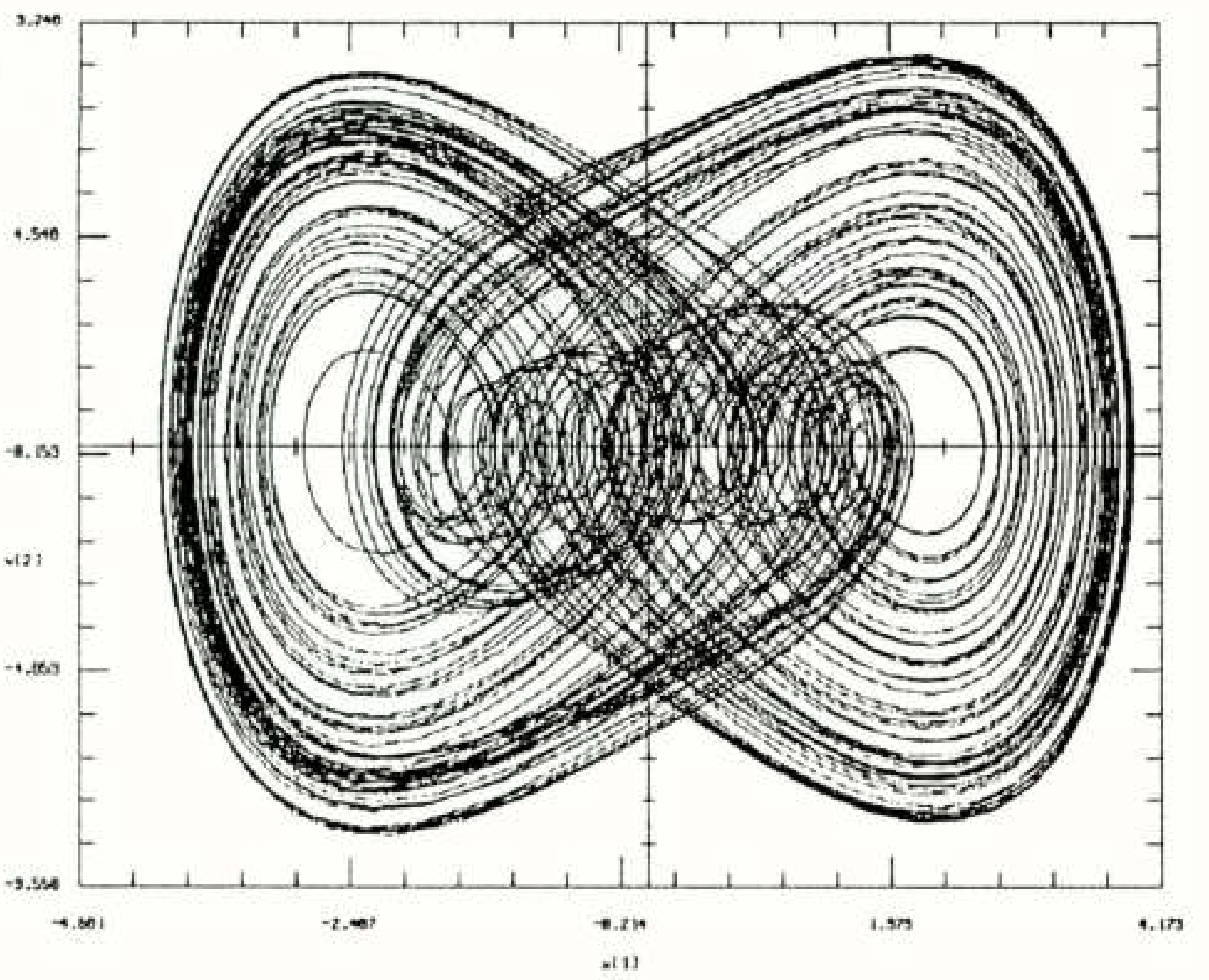
Figuur 28 toont een chaotische trilling, samen met het amplitudo frequentie-spectrum ervan. Het is een numerieke oplossing $\phi = \phi(t)$ van



Figuur 28. Chaotische trilling ϕ (a) en frequentie-spectrum Φ (b) in het circuit van figuur 21, met Duffing-vergelijking $\phi'' + 0{,}1\phi' + \phi^3 = 12\cos t$.

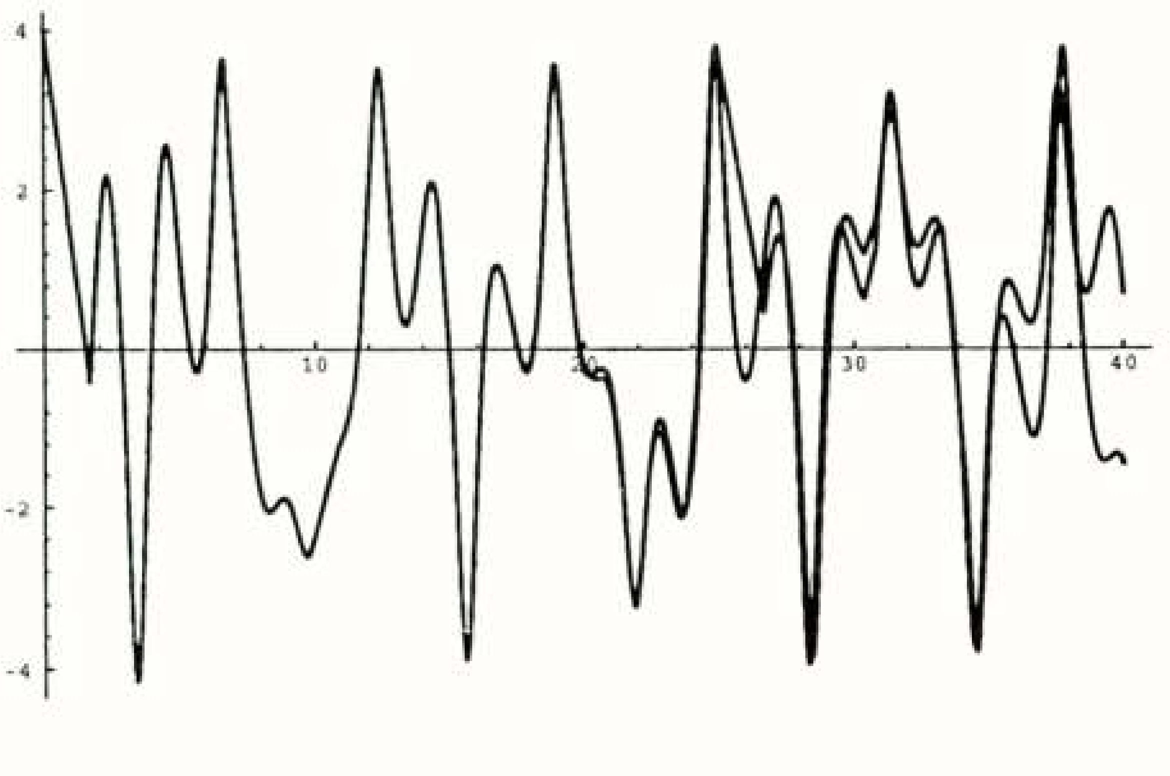
de vergelijking van Duffing (5.3), afgeleid voor het eenvoudige circuit van figuur 21 (stationair bedrijf).

De trilling manifesteert zich in de toestandsruimte als een kluwen van elkaar snijdende trajectoriën (figuur 29).



Figuur 29. De chaotische trilling van figuur 28 in toestandsruimte met $x[1] = \phi$ en $x[2] = \phi'$ als toestandsvariabelen.

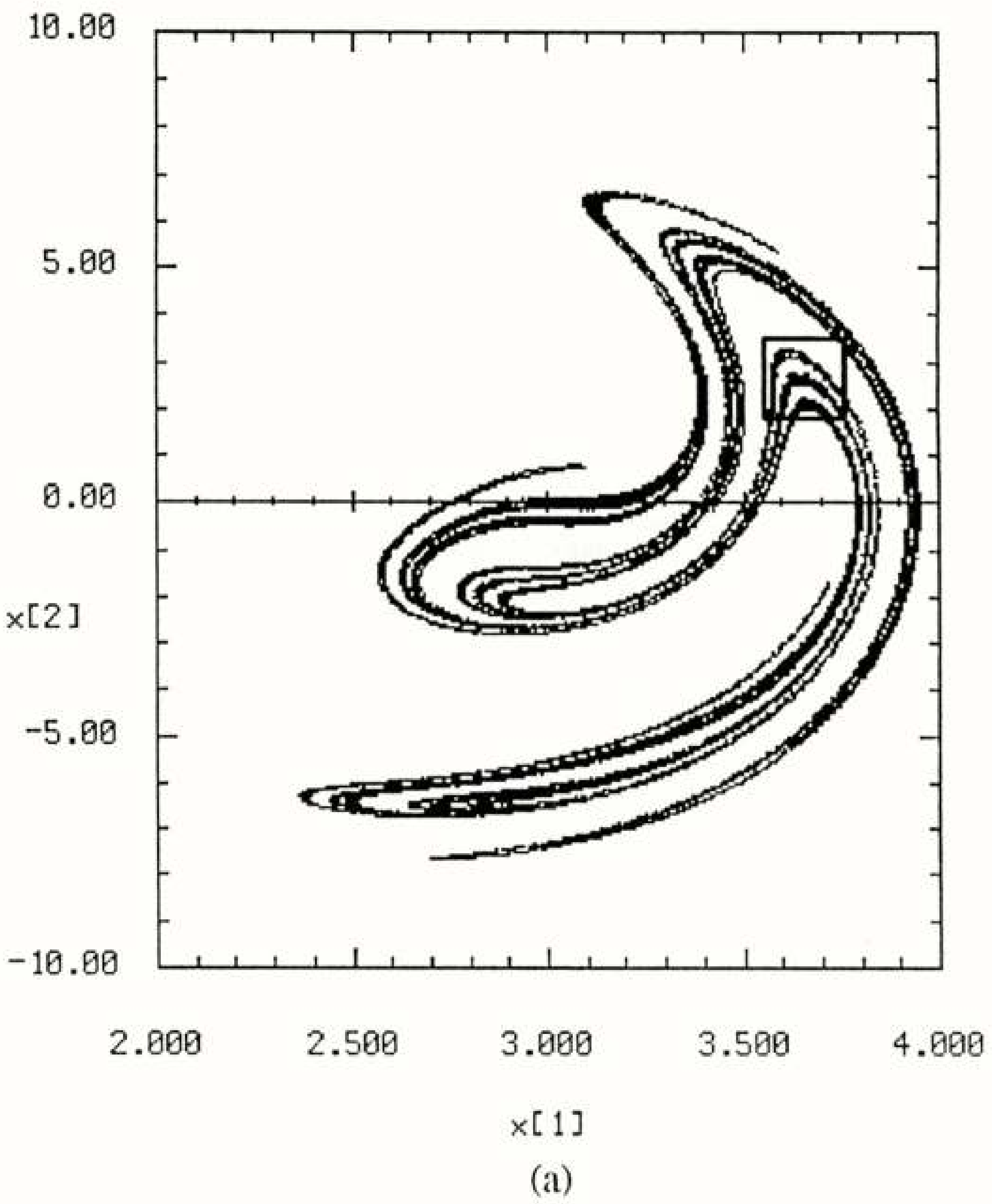
Het grillige verloop van de trilling hangt direct samen met de *gevoelige afhankelijkheid van de begintoestand.* Zelfs de geringste afwijking hierin, geeft op den duur een totaal verschillende uitkomst (kleine veranderingen kunnen grote gevolgen hebben; zie figuur 30).

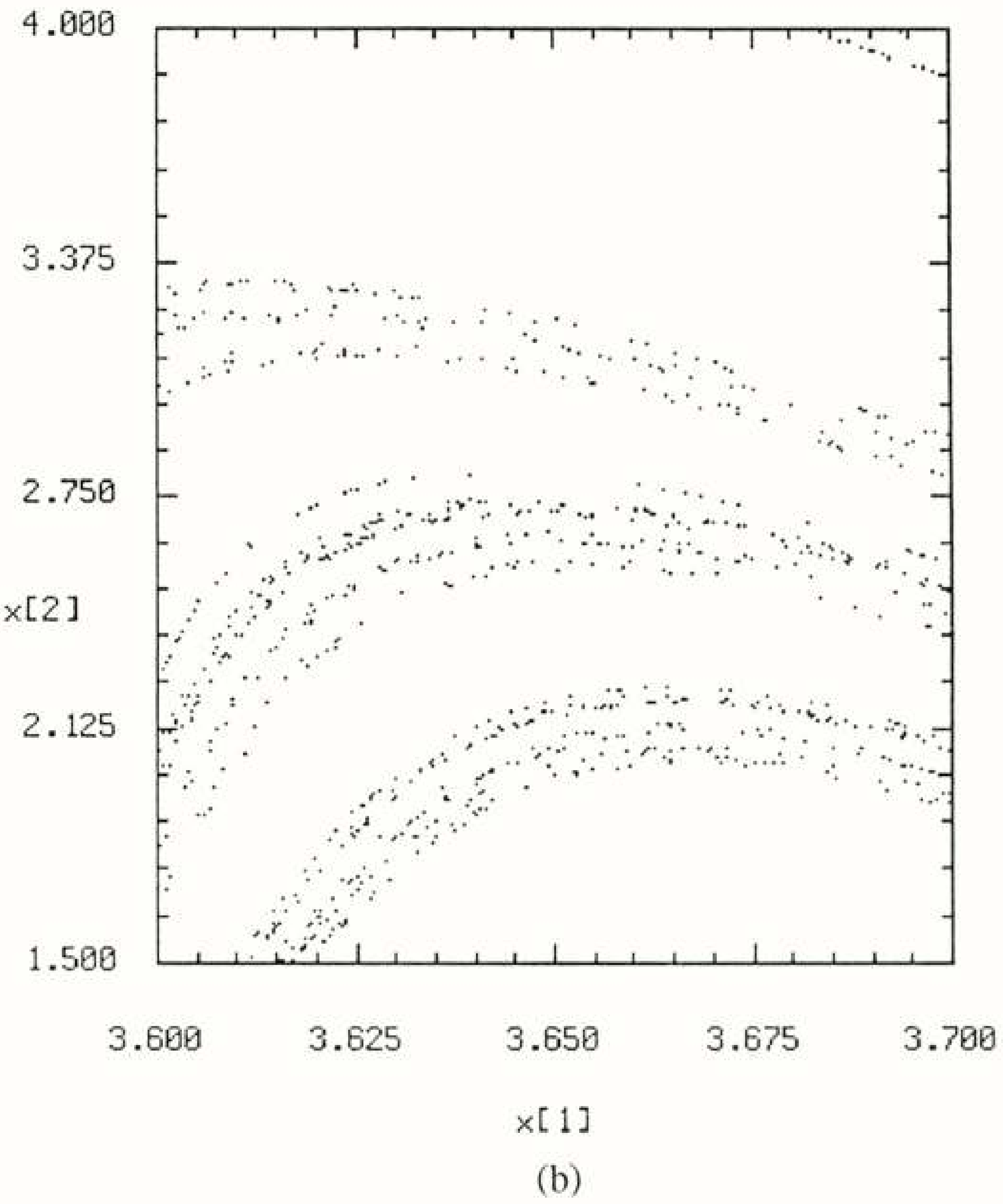


Figuur 30. Twee oplossingen met 0,02% afwijkende begintoestand.

Het is deze eigenschap die het verloop van een chaotische trilling in *experimentele* opstellingen *onvoorspelbaar* maakt. Het is in zulke levensechte omstandigheden immers onmogelijk om de begintoestand met wiskundige precisie voor te schrijven. Men spreekt in dit verband van een *voorspelbaarheidshorizon.* (N.B. In *wiskundig* opzicht is de chaotische trilling natuurlijk wèl volledig gedetermineerd!) Deze beperking is evenwel minder dramatisch dan het lijkt, omdat de globale structuur van de chaotische trilling wèl behouden blijft. De *Poincaré-doorsnede* van figuur 31a haalt die structuur naar voren.

De figuur toont een *geordende* wolk van oneindig veel punten. Zo'n compacte verzameling is karakteristiek voor elke *chaotische attractor.*





Figuur 31. Chaotische attractor van de chaotische trilling in figuur 28 en figuur 29(a) met fijnstructuur (b).

Andere begintoestanden convergeren naar ruwweg hetzelfde patroon (zowel in lokatie, vorm als afmeting).

De fijnstructuur van een chaotische attractor heeft opmerkelijke eigenschappen (figuur 31b). Bij verder uitvergroten, worden zichzelf steeds herhalende patronen waargenomen, typerend voor het geometrische object waarvoor B. Mandelbrot de naam *fractal* heeft bedacht (gebroken dimensie).

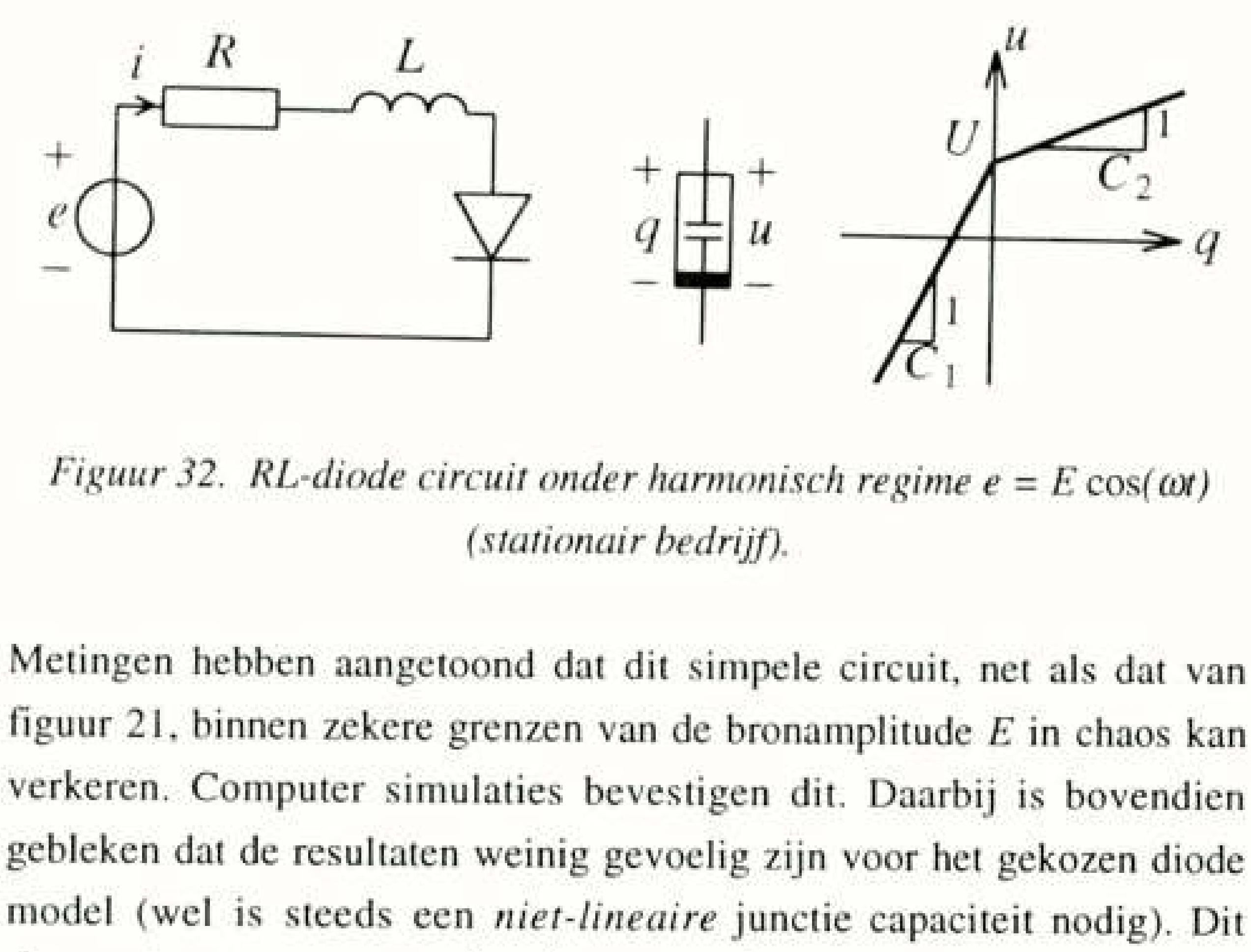
De gevoelige afhankelijkheid van de begintoestand maakt dat kleine startafwijkingen zich persistent voortplanten totdat twee nabijgelegen trajectoriën zelfs geheel ongecorrelleerd raken. Toch voltrekt deze expansie tussen trajectoriën zich in een begrensd gebied van de toestandsruimte van figuur 26 (alwaar de trajectoriën elkaar niet kunnen snijden). Dit moet betekenen dat een bundel chaotische trajectoriën die eerst in de éne richting is geëxpandeerd, later in een andere richting weer ombuigt. Het is dit *strek en vouw* mechanisme dat de feitelijke ordening van de chaotische attractor bepaalt (zie verderop).

Ofschoon een chaotische attractor ook als *vreemde attractor* wordt betiteld, is de attractor net zo min 'vreemd' als chaos complete willekeur is.

Als gezegd, hebben de getoonde resultaten alle betrekking op het circuit van figuur 21. Dit circuit is vanaf de begindagen van de elektrotechniek uitvoerig bestudeerd, zowel experimenteel als theoretisch (o.a. door G.J. Elias). De onderzoeksresultaten tot 1964 zijn samengevat in het klassiek geworden boek van C. Hayashi [29]. Daarna heeft het tot 1978 geduurd voordat Y. Ueda de chaotische attractor van figuur 31 ontdekte [30].

6.2 Periode-verdubbeling

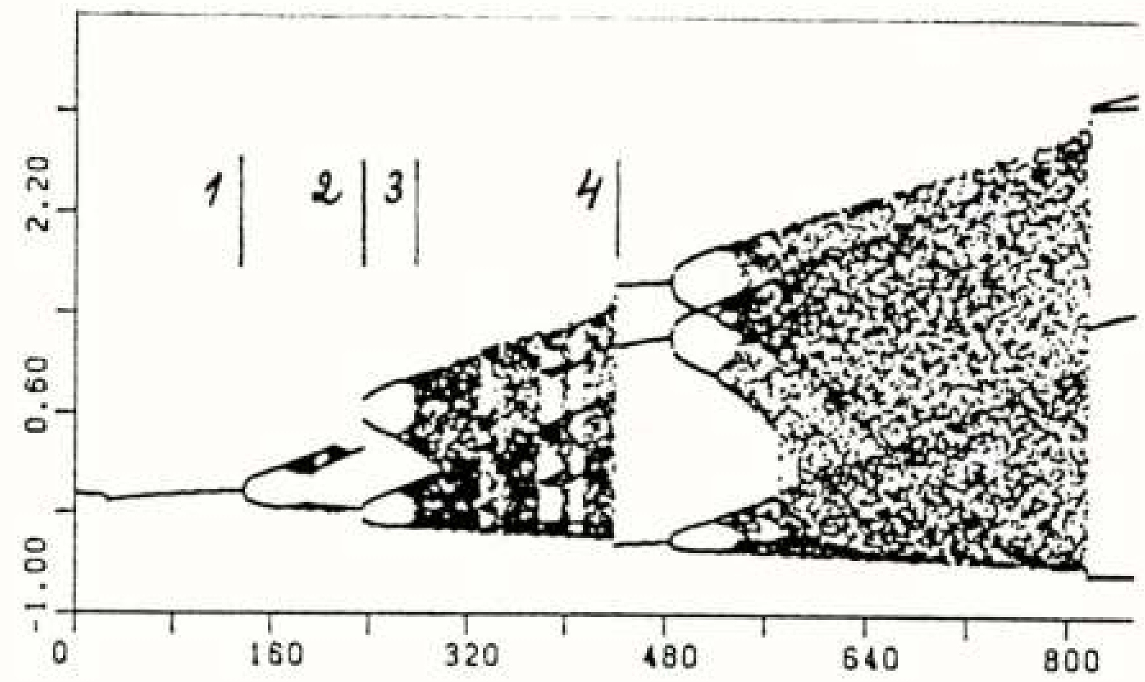
In figuur 32 staat een *niet-autonoom RL*-diode circuit. De inherente junctie *capaciteit* van de diode maakt het circuit van de *orde twee*.



Figuur 32. RL-diode circuit onder harmonisch regime $e = E\cos(\omega t)$ (stationair bedrijf).

Metingen hebben aangetoond dat dit simpele circuit, net als dat van figuur 21, binnen zekere grenzen van de bronamplitude E in chaos kan verkeren. Computer simulaties bevestigen dit. Daarbij is bovendien gebleken dat de resultaten weinig gevoelig zijn voor het gekozen diode model (wel is steeds een *niet-lineaire* junctie capaciteit nodig). Dit demonstreert eens te meer dat chaos een *robuust* verschijnsel is. Zelfs als het diode model drastisch wordt vereenvoudigd tot alléén de niet-lineaire capaciteit van figuur 32, blijken globaal dezelfde uitkomsten te worden verkregen [8]. Figuur 33 toont het elektrische gedrag onder deze aanname. De figuur is een één-dimensionaal *bifurcatie-diagram* met E als *bifurcatie-parameter*. Eén-dimensionaal, omdat slechts één van de twee toestandsvariabelen in beeld komt.

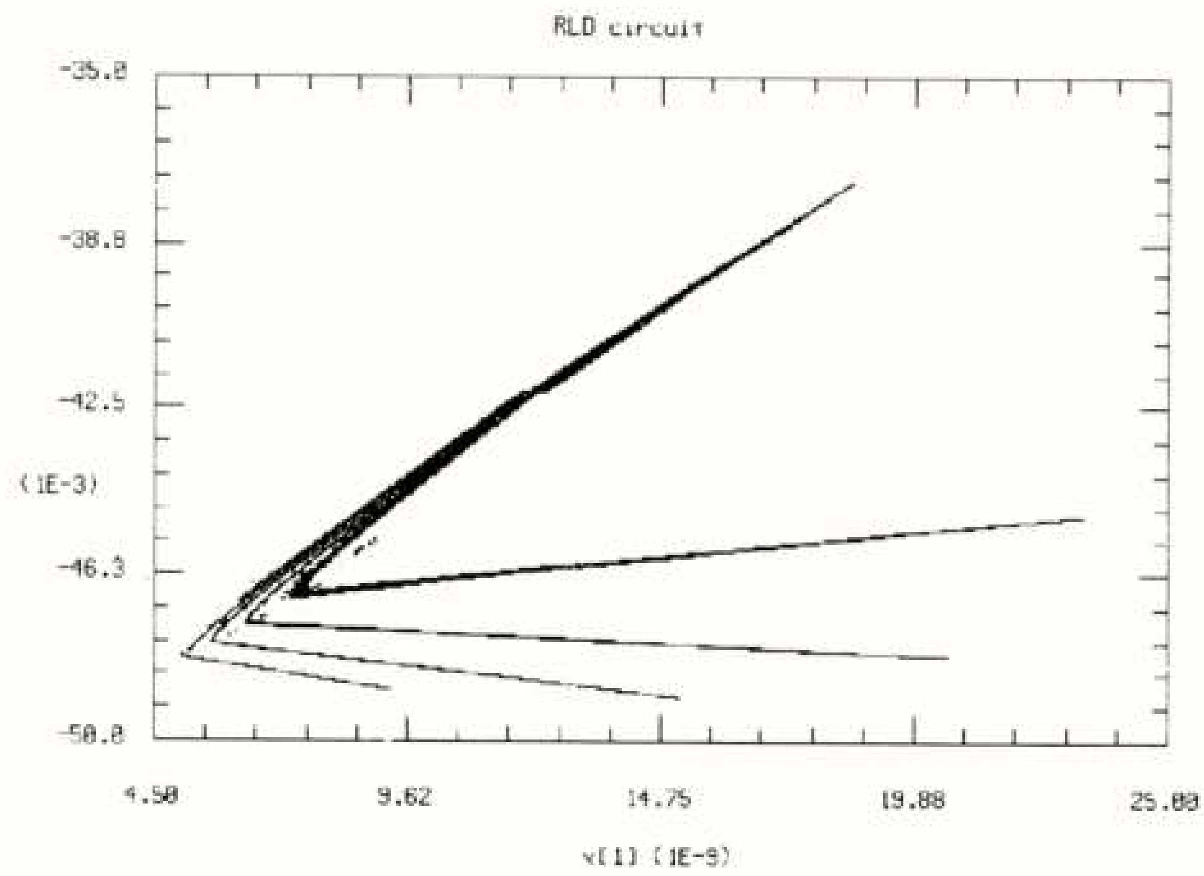
Bij elke vaste waarde van E staat vertikaal de waarde van de Poincaré-doorsnede m.b.t. $q = q(t)$ uitgezet (stationair bedrijf). Dus, k verschillende punten op de q-as duidt op de aanwezigheid van de *k-de subharmonische*. Voor $E < E_1$ staat het enige punt op de q-as voor de 'normale' T-periodieke oplossing (met $T = 2\pi/\omega$ de bronperiode). Juist voorbij het



Figuur 33. Bifurcatie-diagram ($R = 60\Omega$, $L = 0{,}1$ mH, $U = 0{,}1$ V, $C_1 = 0{,}1$ μF, $C_2 = 400$ pF, $\omega/2\pi = 700$ kHz in figuur 32). Vertikale schaal q [nC], horizontale schaal E [mV].

eerste bifurcatiepunt E_1 is er plotseling een $2T$-periodieke stroom ontstaan, die bij het tweede bifurcatiepunt E_2 even plotseling overgaat in $4T$-periodiek gedrag. Deze *periode-verdubbeling* gaat door *ad inf.*, totdat net voorbij de limietwaarde E_3 een niet aftelbaar aantal subharmonischen aanwezig is, corresponderend met een aperiodieke trilling met een continu frequentie-spectrum. Zo te zien, persisteert deze chaotische trilling in het eerste chaotische traject dat loopt tot E_4, en waarna opeens een $3T$-periodieke trilling verschijnt. Nu herhaalt het periode-verdubbelingsschema zich totdat het tweede chaotische traject wordt bereikt, enz.

Het chaotische gedrag komt volledig in beeld als de gehele chaotische attractor wordt getoond; zie figuur 34 voor een waarde van E in het vierde chaotische traject.



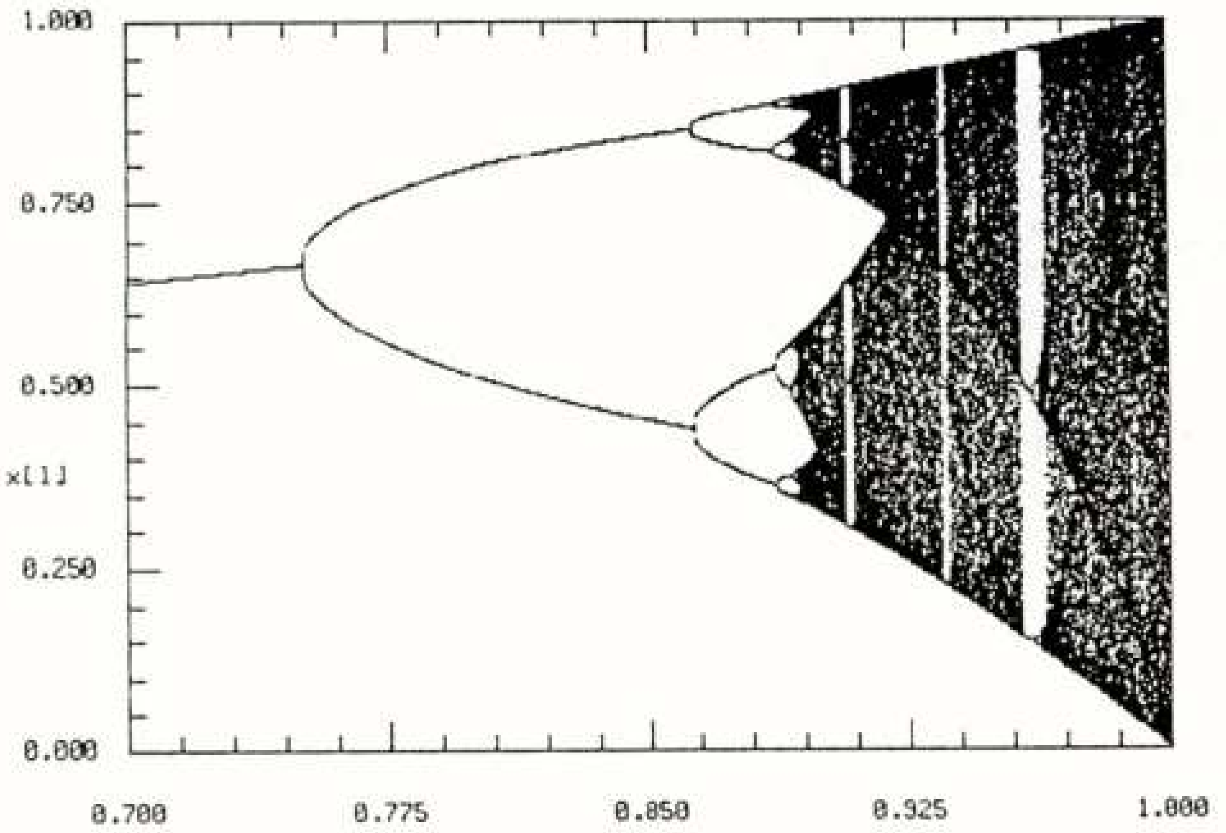
Figuur 34. Chaotische attractor van het RL-diode circuit ($E = 2$ V).

Het bifurcatie-diagram van figuur 33 vertoont treffende gelijkenis met dat van een zekere klasse één-dimensionale, niet-lineaire recurrente betrekkingen van het type $x_{k+1} = f(x_k)$. Hiervan zijn de eigenschappen uitvoerig bestudeerd aan de hand van de *logist*

(6.1) $$x_{k+1} = \lambda x_k(1 - x_k) \quad ,$$

waarin λ de bifurcatie-parameter is. Voor zekere waarden van λ heeft (6.1) één of meerdere evenwichtspunten x, waarvoor respectievelijk $x = f(x)$ of $x = f(f(x))$, enz., corresponderend met periode–1 of periode–2, enz.

oplossingen. Voor weer andere waarden van λ worden aperiodieke oplossingen verkregen (chaos), zie figuur 35.



Figuur 35. Bifurcatie-diagram van de logist (6.1).

In 1978 ontdekte M. Feigenbaum de volgende wetmatigheid voor de periode-verdubbeling

(6.2) $$\lambda_k = \lambda_\infty - c\delta^{-k} \quad ,$$

waarin λ_k het k-de bifurcatiepunt van de bifurcatie-cascade is. M.a.w., de opeenvolgende bifurcatiepunten convergeren volgens een meetkundige reeks naar de limit λ_∞, waarna het eerste chaos traject verschijnt. Er volgt

(6.3) $$\lim_{k\to\infty} \frac{\lambda_k - \lambda_{k-1}}{\lambda_{k+1} - \lambda_k} = \delta$$

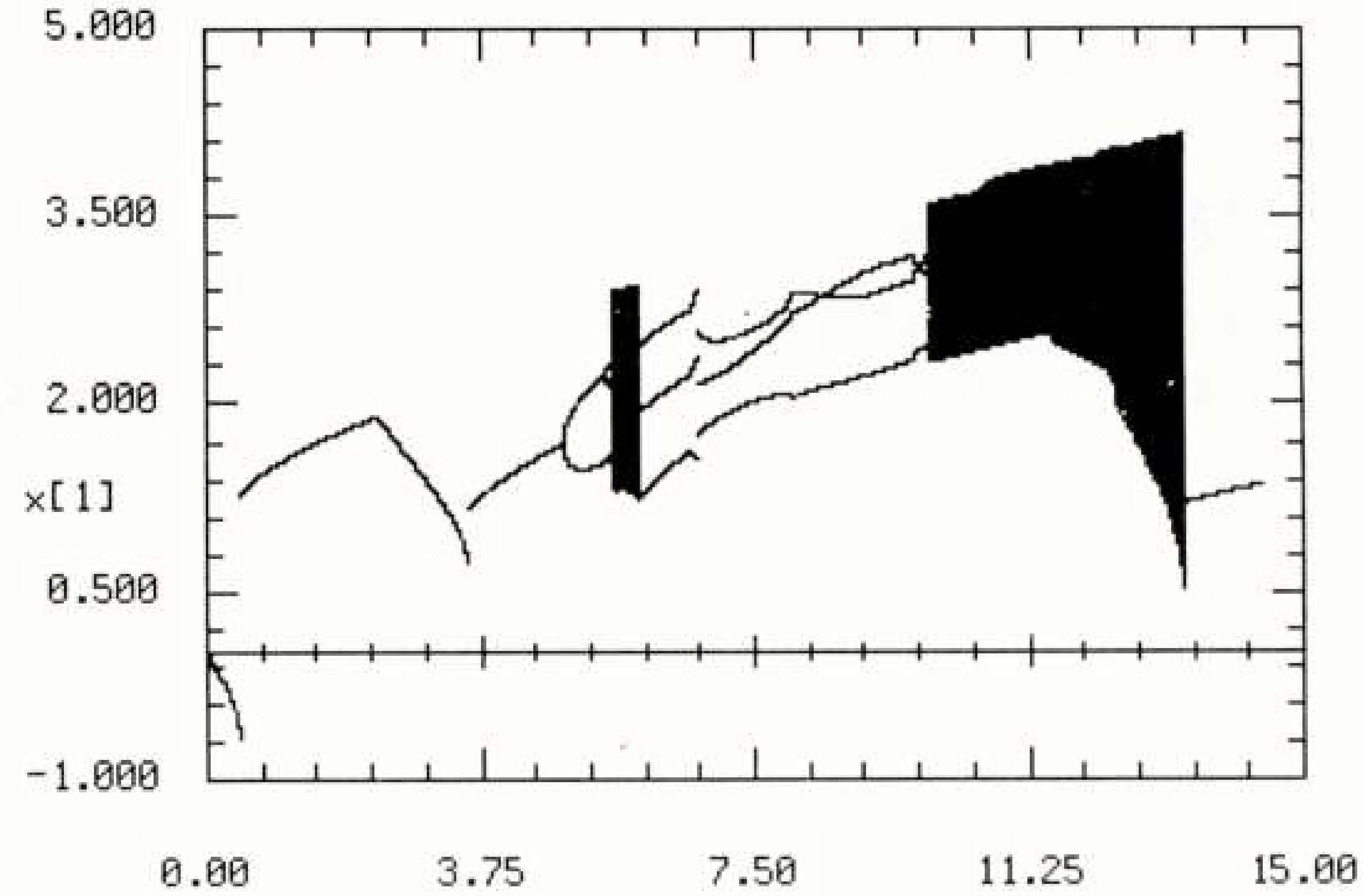
met de door Feigenbaum numeriek gevonden waarde $\delta = 4{,}66920\ldots$ Dit *getal van Feigenbaum* wordt wel een *universele* schaalconstante genoemd omdat precies *hetzelfde* getal wordt gevonden voor afbeeldingen van het type $x_{k+1} = f(x_k)$ die slechts *kwalitatieve* gelijkenis met de logist vertonen!

Een ander aspect van het bifurcatie-diagram is dat het optreden van een *periode-3* oplossing kennelijk *impliceert* dat er een *chaos* traject is gepasseerd. Ook zijn er in de chaos trajecten smalle *vensters* te onderscheiden waarbinnen periodiek gedrag optreedt.

Ofschoon metingen aan het RL-diode circuit grote overeenkomsten vertonen met de logist, inclusief kwantitatieve uitkomsten als het getal van Feigenbaum, is er tot op heden, voorzover bekend, geen sluitende verklaring voor het dynamische gedrag van het simpele RL-diode circuit!

De betrekkelijk eenvoudige vorm van de chaotische attractor in figuur 34 is kennelijk een aanwijzing dat de *twee*-dimensionale Poincaré-afbeelding (5.6) *kwalitatief* kan worden gemodelleerd door de *één*-dimensionale logist (6.1).

De suggestie wordt ondersteund door het bifurcatie-diagram van figuur 36. Het heeft betrekking op het niet-lineaire RLC-circuit van figuur 21 met meer complexe chaotische attractors van het in figuur 31 getoonde type. Ofschoon de gelijkenis met de logist inderdaad veel minder sprekend is, zijn er niettemin duidelijke overeenkomsten. Weer wordt periode-verdubbeling waargenomen, terwijl het verschijnen van de 3-de subharmonische ook hier chaos impliceert. Voorts zijn er bij verder uitvergroten binnen de chaos-trajecten smalle vensters met (subharmonisch) periodiek gedrag te onderscheiden. Ook op grotere schaal wisselen periodieke en chaotische trajecten elkaar steeds af.



Figuur 36. Bifurcatie-diagram m.b.t. het niet-lineaire RLC-circuit van figuur 21, met Duffing-vergelijking $\phi'' + 0{,}1\phi' + \phi^3 = B\cos t$ (B is de bifurcatie-parameter).

De discontinuïteiten in het bifurcatie-diagram zijn de eerder genoemde 'kipverschijnselen' die G.J. Elias met analytische middelen heeft onderzocht [2]. Zij worden verklaard door bifurcaties die naast een stabiele trilling, tevens een instabiele, en derhalve experimenteel niet waarneembare trilling ten gevolge heeft.

De door Elias gerapporteerde kwalitatieve experimentele uitkomsten m.b.t. de niet-lineaire condensator-spoel seriekring worden in hoofdzaak bevestigd door de computerberekening van figuur 36 [2c]. Naast de zojuist beschreven kwalitatieve overeenkomsten met de logist, constateerde Elias eveneens de duidelijke afwijking, dat voorbij een voldoend grote waarde van de bronamplitude ($B \simeq 13$ in figuur 36) plotseling weer een periodieke trilling met de grondfrequentie verschijnt (wel super-, maar geen subharmonischen; de 'staart' in de figuur).

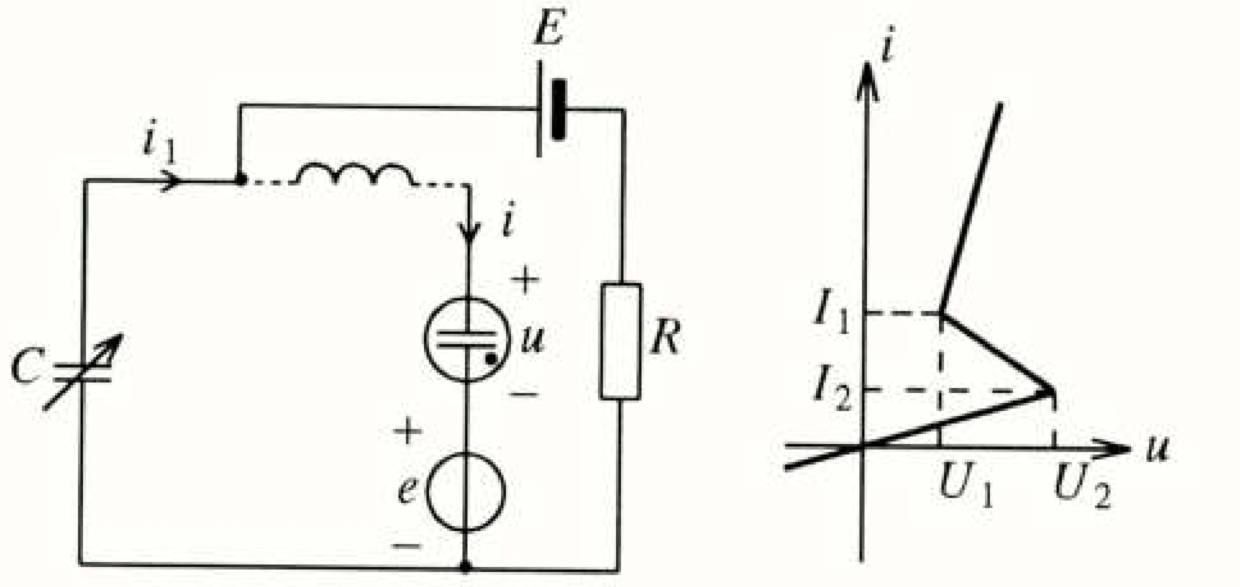
Voorts heeft het er alle schijn van dat de chaos-trajecten in figuur 36 juist de door Elias experimenteel waargenomen 'instabiele toestanden' zijn. Zonder daar overigens veel extra aandacht aan te besteden, indentificeerde Elias genoemde toestanden op theoretische gronden in elk geval met aperiodieke trillingen [2c, d]! Zou Elias het interpretatiekader van een Poincaré-doorsnede tot zijn beschikking hebben gehad, dan zou de door Ueda in 1978 ontdekte chaotische attractor van figuur 31 zijn verschenen!

6.3 Periode-bijtelling

Figuur 37 toont de klassieke neonbuis-oscillator waarover Van der Pol en Van der Mark in 1927 berichtten '*onregelmatige ruis*' te hebben waargenomen. Het circuit was bedoeld als frequentie-deler (zie bijgevoegde overdruk).

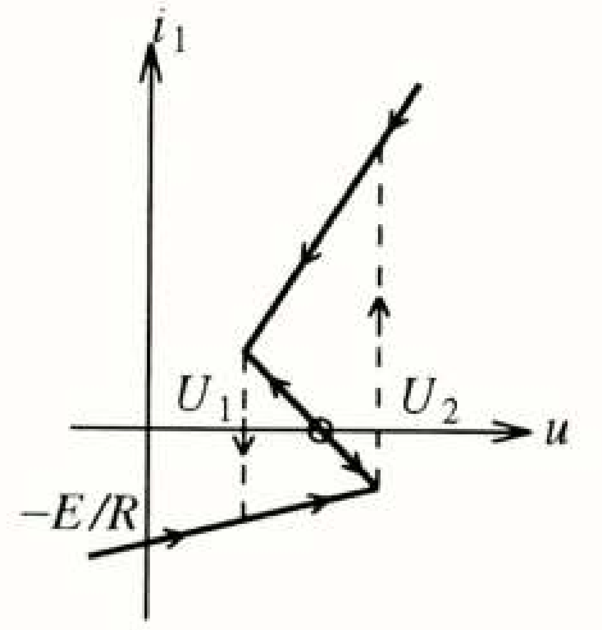
Omdat een valide dynamisch model van de neonbuis de toevoeging van een kleine serie-inductiviteit vereist (gestippeld weergegeven), is het *niet-autonome* circuit van de *orde twee*.

Als $e = 0$, 'ziet' de capaciteit C bij een eerste verwaarlozing van de parasitaire inductiviteit een *resistieve* parallelverbinding, bestaande uit de neonbuis en een spanningsdoos. Indien $(E - U_1)/I_1 < R < (E - U_2)/I_2$ wordt daarvoor u-i-karakteristiek van figuur 38 gevonden, resulterend in de aangegeven dynamische route. De limit-cycle die bij toevoeging van



Figuur 37. Gedwongen neonbuis-oscillator met $e = E_1 \cos(\omega_1 t)$ en C als bifurcatie-parameter.

de eerder verwaarloosde inductiviteit ontstaat, heeft, zoals eerder betoogd, bij benadering dezelfde vorm.



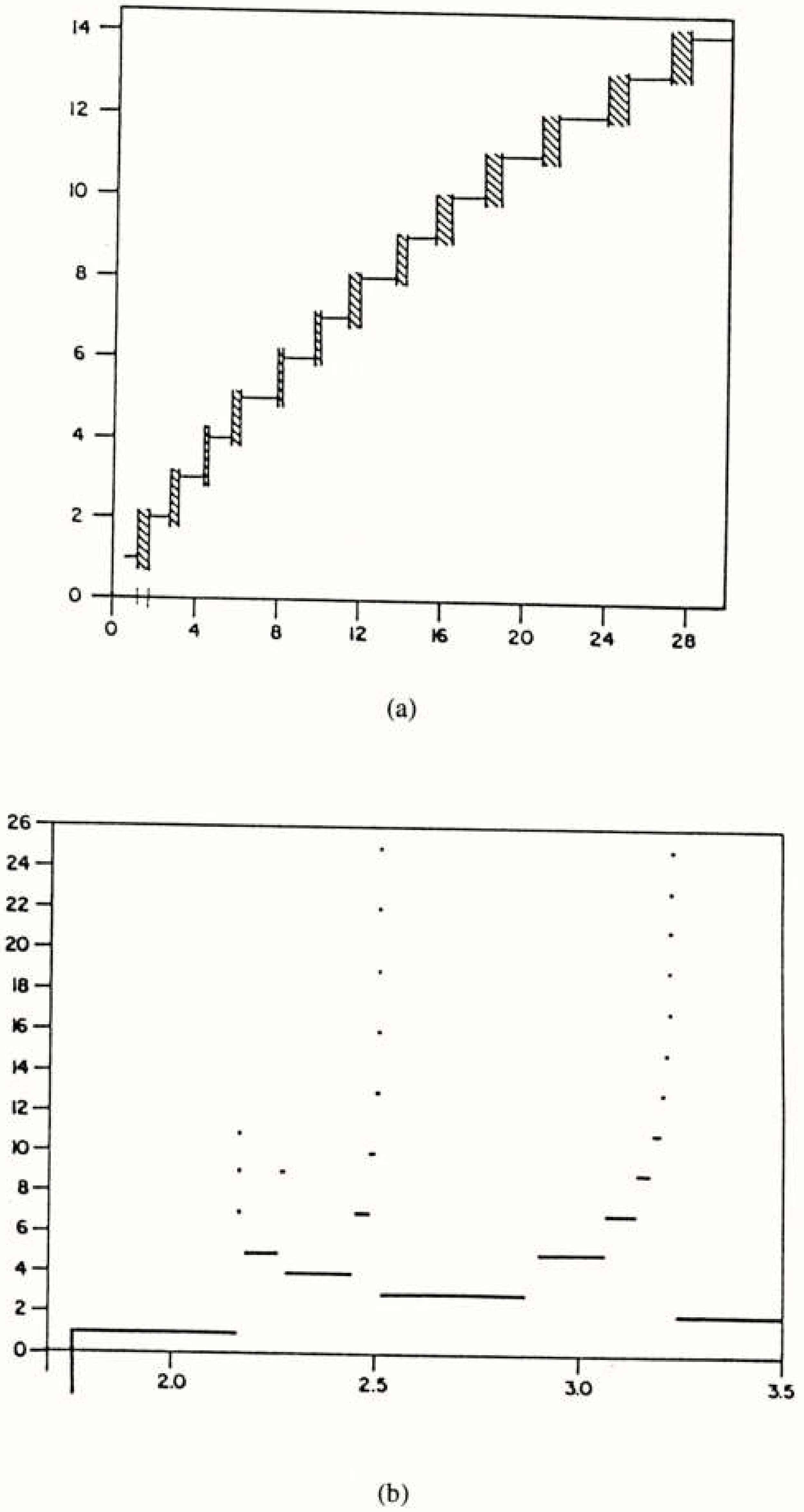
Figuur 38. Het autonome circuit van figuur 37 is een relaxatie-oscillator ($e = 0$).

Het autonome circuit ($e = 0$) functioneert als een *relaxatie-oscillator* waarvan de frequentie ω_0 kleiner (groter) wordt als de variabele C op een grotere (kleinere) waarde wordt ingesteld.

Nu wordt de relaxatie-oscillator onder het regime geplaatst van $e = E_1 \cos(\omega_1 t)$. Indien ω_0 niet te veel van ω_1 verschilt, blijkt de oscillator te worden gesynchroniseerd door de opgelegde frequentie ω_1 (het Huygens-effect). Bij een continue *verlaging* van ω_0 (C groter) gaat de synchronisatie bij een zekere waarde van C (bifurcatiepunt) plotseling verloren waarna de oscillator voor een net nog iets lagere waarde van ω_0 wordt *gevangen* in de frequentie $\omega_1/2$ (2-de subharmonische). Volgens deze synchronisatie eigenschappen van de oscillator worden bij steeds verder verlagen van ω_0 achtereenvolgens de frequenties $\omega_1/3$, $\omega_1/4$, enz. verkregen. Dit was het gedrag waar Van der Pol en Van der Mark naar zochten. De 'trap'-structuur van figuur 39a geeft dit weer.

In de kleine frequentie-intervallen, gelegen tussen de frequentie waar plotseling *verlies van synchronisatie* met een vorige subharmonische optreedt, en de frequentie waarbij de oscillator wordt *gevangen* in de volgende, observeerden Van de Pol en Van der Mark de 'onregelmatige ruis' (in figuur 39a gearceerd weergegeven). Daarmee waren zij de eersten die in de internationale vakliteratuur gewag maakten van wat naderhand chaos is gebleken.

In 1986 hebben Kennedy en Chua het experiment van Van der Pol en Van der Mark zo goed mogelijk herhaald [31]. Daarbij verkregen zij in de eerste plaats de resultaten uit 1927 terug, maar vonden bovendien een onderliggende *ordening* in de 'ruis'-intervallen. Deze blijkt er ondermeer



Figuur 39. Bifurcatie-diagram met C als bifurcatie-parameter.

uit te bestaan dat de trap-structuur van figuur 39a zichzelf in die intervallen eerst herhaalt, om zich binnen die duplicaten met nog weer fijnere duplicaten opnieuw te herhalen enz., typerend voor de fractale structuur van de zogenaamde *duivelstrap*, zie figuur 39b.

Anders dan de periode-verdubbeling van hiervoor, blijkt nu dat bij elke stabiele periode (trede van een trap) een wetmatig bepaald *geheel* getal moet worden *opgeteld* om de volgende te bereiken. Deze *periode-bijtelling* wordt onderbroken door steeds smallere intervalletjes waarbinnen verlies van synchronisatie optreedt, uitmondend in chaos.

De kwalitatieve gedragsbeschrijving van hierboven is juist de signatuur van de één-dimensionale *cirkel-afbeelding*

(6.4) $$\theta_{k+1} = \theta_k + \frac{\lambda}{2\pi}\sin(2\pi\theta_k) + \omega_0 / \omega_1 \quad ,$$

die wel meer opduikt als vereenvoudigd model bij synchronisatie vraagstukken waar twee frequenties ω_0 en ω_1 niet-lineair interacteren (λ is de

bifurcatie-parameter). Het model speelt dezelfde rol als de logist van hiervoor.

De werkelijke verklaring voor zowel het globale als het detail-gedrag van de relaxatie-oscillator moet echter worden gevonden in de limit-cycle beweging van figuur 38 als daar ook de aandrijvende bronfrequentie wordt ingebracht.

De besproken verschijnselen zijn *prototypen* van *wegen naar chaos* als gevolg van bifurcaties. Onbesproken blijven de *quasi-periodieke* weg naar chaos ('torus-break-down') en de *intermitterende* weg naar chaos (waar intervallen van min of meer regelmatige trillingen worden afgewisseld door korte uitbarstingen van onregelmatig gedrag).

6.4 Van der Pol en niet-lineaire dynamica

De *eenvoud* van de niet-autonome Van der Pol-vergelijking (5.5) contrasteert scherp met de mogelijke *complexiteit* van de oplossingen. Geïnspireerd door de eerste publikaties van Van der Pol in de jaren twintig [3], rapporteerden Cartwright en Littlewood in 1945 een 'slechte' oplossing te hebben gevonden [32], en bewees Levinson in 1949 het bestaan van 'singuliere' oplossingen [33]. Deze oplossingen worden volgens een willekeurig patroon heen en weer geslingerd tussen twee verschillende subharmonischen, en staan nu bekend onder de naam 'chaos'. Op zijn beurt werd Smale door deze uitkomst op het spoor gezet om in 1967 zijn wiskundige model voor chaos te bedenken (de zogenaamde hoefijzerafbeelding, zie verderop) [34]. De anti-climax volgde in 1983, toen Parker en Chua merkten dat de theoretisch wèl gevonden chaos experimenteel niet waarneembaar bleek (de stationaire chaotische trillingen blijken uiterst kritisch voor de begintoestand) [35].

Curieus genoeg, werd bij deze eerste speurtocht naar 'onregelmatigheid', de gedwongen *neonbuis-oscillator* van Van der Pol geheel over het hoofd gezien. En dat, terwijl Van der Pol en Van der Mark reeds in 1927, nota bene als eersten, rapporteerden 'onregelmatige ruis' te hebben waargenomen (kennelijk zonder zich ten volle te realiseren dat het hier een specifieke onregelmatigheid betrof). Als gezegd, werd hun experiment pas in 1986 herhaald, waarbij het chaotische karakter van de 'onregelmatige ruis' inderdaad werd aangetoond.

B. van der Pol behoort samen met G. Duffing tot de meest prominente vroege onderzoekers op het gebied van de moderne niet-lineaire dynamica.

7. OSCILLATOR VAN CHUA

In 1983 heeft L.O. Chua een zo eenvoudig mogelijk elektrisch circuit op papier gezet dat een autonome chaotische attractor zou moeten hebben [36]. Na een spoedige computer-simulatie en de kort daarop volgende experimentele bevestiging, is dit circuit sindsdien onderwerp van intensieve studie. Het is inmiddels het best begrepen circuit dat chaotische trillingen produceert. Er wordt zelfs geclaimd dat de materiële realisatie van Chua's circuit thans het enige concrete en robuuste systeem is waarin chaos zowel *experimenteel*, *numeriek* als *analytisch* is aangetoond. Het circuit is gemakkelijk en tegen lage kostprijs te bouwen met standaard componenten. Recentelijk zijn er ook chip versies van.

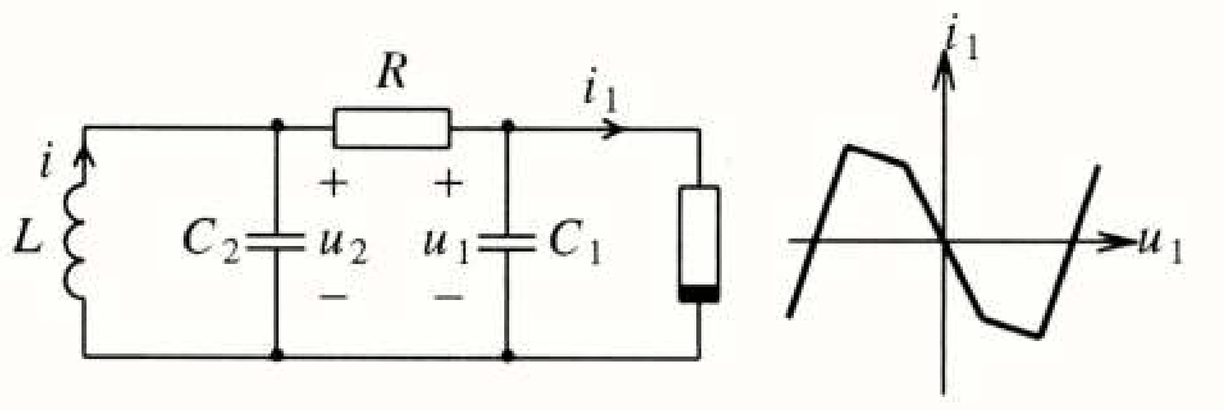
Met al zijn varianten, speelt het circuit van Chua een prominente rol in het chaos onderzoek. Het vertoont een breed repertoire aan niet-lineaire dynamische verschijnselen (limit-cycles, torus attractors en chaotische attractors), inclusief de bifurcatie wegen naar chaos van de vorige paragraaf. Daarbij wordt men al snel geconfronteerd met fundamentele en deels onopgeloste wiskundige vraagstellingen. Niettemin komen er sinds kort allerlei toepassingen in beeld.

Daarnaast wordt het circuit van Chua gepropageerd als didactisch paradigma voor chaos, waarbij het een vergelijkbare rol wordt toebedacht als de klassieke RLC-resonantie kring in de lineaire theorie.

Hieronder volgt een beknopte uiteenzetting.

7.1 Toestandsvergelijking

Figuur 40 toont het niet-lineaire dynamische *circuit van Chua*. Het circuit is *autonoom* en van de *orde drie*.



Figuur 40. Het circuit van Chua.

Het enige niet-lineaire element is de *actieve* spanningsbestuurde weerstand. Daarbij zijn de segmenten met *negatieve* helling een cruciaal ontwerpcriterium. De segmenten met een positieve helling zijn niet van belang voor een chaotische werking, maar natuurlijk wel met het oog op een praktische implementatie. De keuze voor een stuksgewijs affiene karakteristiek is evenmin essentieel. Voordeel is wèl dat zo'n karakteristiek eenvoudig kan worden gerealiseerd (zie verderop) en zich bovendien gemakkelijk leent voor analytische doeleinden. Daarbij wordt de niet-lineaire weerstand op elk lijnsegment vervangen door een geschikte stroom- of spanningsdoos, zodat een *stukgewijs lineaire* circuit interpretatie mogelijk wordt.

Indien de *u-i*-relatie van de niet-lineaire weerstand wordt genoteerd als $i_1 \equiv \tilde{i}(u_1)$, luiden de circuit vergelijkingen

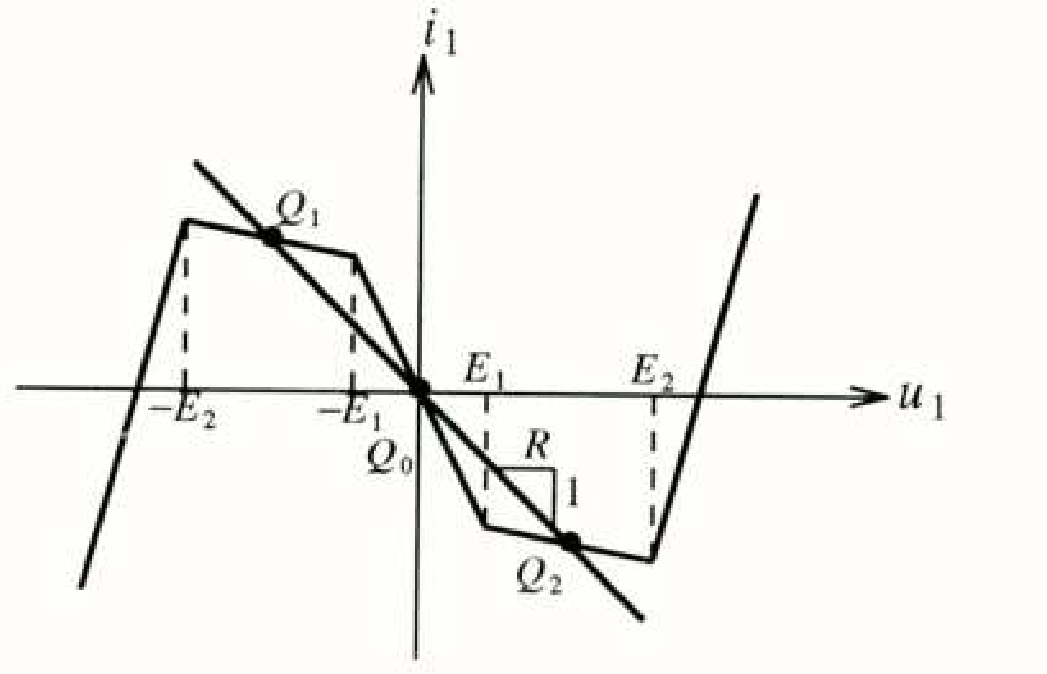
$$(7.1) \qquad \begin{cases} u_1' = -\dfrac{1}{RC_1}u_1 - \dfrac{1}{C_1}\tilde{i}(u_1) + \dfrac{1}{RC_1}u_2 \\ u_2' = \dfrac{1}{RC_2}u_1 \qquad\qquad - \dfrac{1}{RC_2}u_2 + \dfrac{1}{C_2}i \\ i' = \qquad\qquad\qquad\qquad -\dfrac{1}{L}u_2 \end{cases}$$

Met $x = (u_1, u_2, i)$ als toestandsvector wordt (7.1) herkend als de nu driedimensionale, niet-lineaire *autonome toestandsvergelijking* van (4.2), te weten $x' = f(x)$ met $x(t_0) = x_0$ een gegeven begintoestand. Er volgt dat de trajectoriën elkaar *niet kunnen snijden*.

Wegens de symmetrische *u-i*-karakteristiek vertoont het snelheidsveld $f(x)$ *punt-symmetrie* t.o.v. de oorsprong van de toestandsruimte ($f(x) = -f(-x)$).

7.2 Chaotische attractor

Formeel volgen de *evenwichtspunten* in de drie-dimensionale toestandsruimte via het nul stellen van het rechterlid van (7.1) als de oplossingen van $u_2 = 0$, $u_1 + Ri = 0$ en $u_1 + R\,\tilde{i}(u_1) = 0$. Zij corresponderen met de snijpunten van de niet-lineaire weerstandskarakteristiek met de *belastingslijn* $u_1 = -Ri_1$ (vervang de capaciteiten en de inductiviteit in Chua's circuit respectievelijk door open klemmenparen en een kortsluiting). Volgens de opzet van figuur 41 zijn er *drie* evenwichtspunten, respectievelijk genoteerd als x_{Q1}, x_{Q0} en x_{Q2}.



Figuur 41. Niet-lineaire weerstandskarakteristiek met belastingslijn. Q_1, Q_0 en Q_2 corresponderen met de evenwichtspunten x_{Q1}, x_{Q0} en x_{Q2} van Chua's circuit.

Het *lokale* toestandsgedrag $x = x(t)$ nabij elk van die evenwichtpunten wordt volgens (4.3) bepaald door de Jacobi-matrix A, hier zonder moeite afgelezen als het coëfficiëntenschema in het rechterlid van (7.1), waarin $\bar{i}(u_1) = Gu_1$, met G de *lokale* conductantie. Nudat A van de orde drie is, levert de karakteristieke vergelijking (4.4) voor elk evenwichtspunt *drie* eigenwaarden λ_1, λ_2 en λ_3. Afhankelijk van de circuit-parameters zijn die alle reëel of één reëel en twee complex geconjugeerd. Met de laatste mogelijkheid als uitgangspunt, worden zij genoteerd als

(7.2) $$\lambda_{1,2} = \sigma \pm \mathrm{j}\omega \quad \text{en} \quad \lambda_3 = \gamma$$

Onder de extra aanname voor elk evenwichtspunt x_Q

(7.3) $$\sigma\gamma < 0 \quad ,$$

zijn *alle* evenwichtspunten *instabiel*.

Laat vervolgens $\xi_{1,2} = \eta_1 \pm \mathrm{j}\,\eta_2$ de eigenvectoren zijn die corresponderen met $\lambda_{1,2}$. Dan is het eenvoudig in te zien dat η_1 en η_2 het *eigenvlak* $E^c(Q)$ opspannen waarop de volgende spiraalbeweging wordt beschreven

(7.4) $$x_c = a\ \exp(\sigma t)\{\cos(\omega t + \varphi)\eta_1 + \sin(\omega t + \varphi)\eta_2\},\ x_c \in E^c(Q) \ .$$

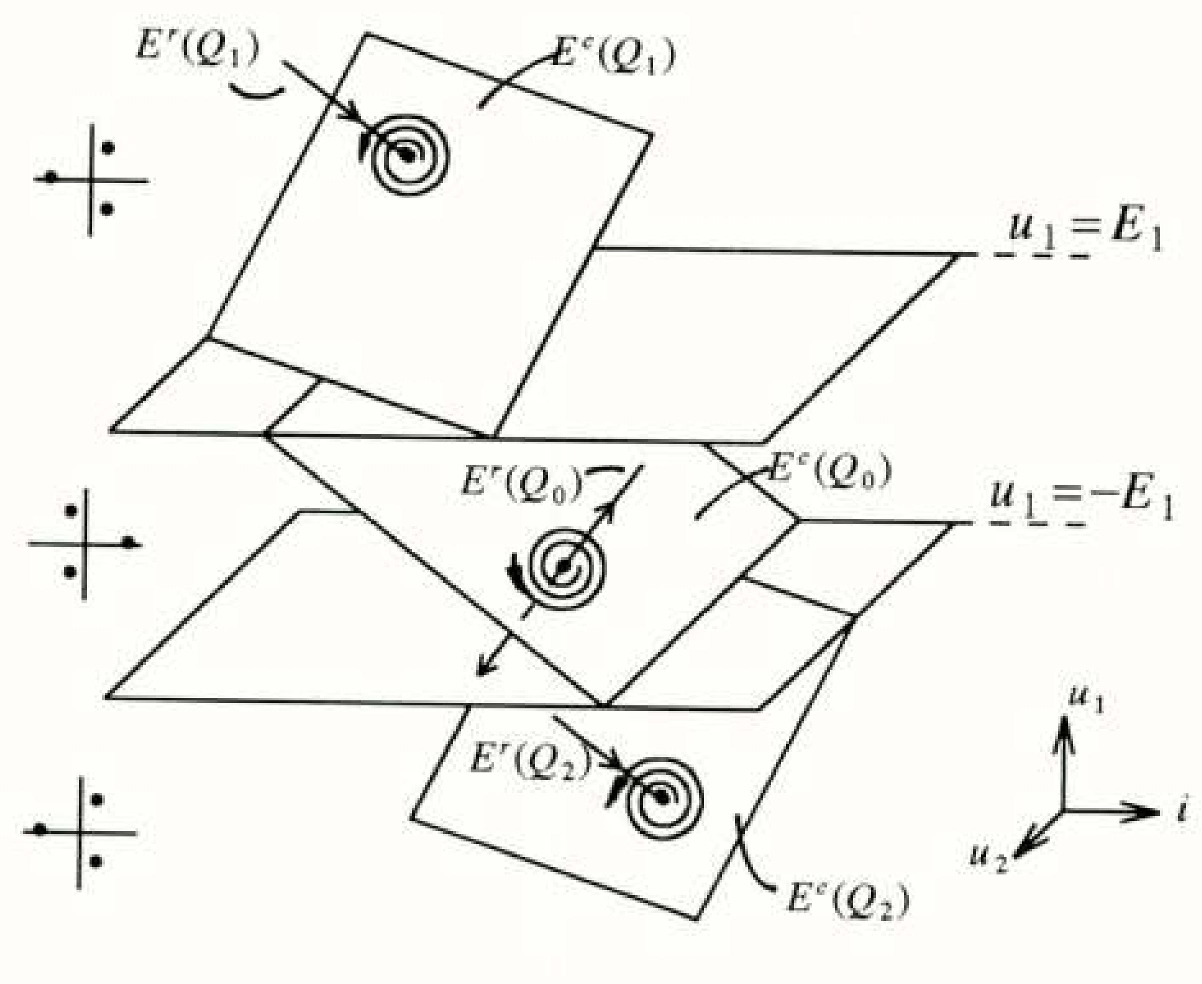
De complementaire beweging x_r van x_c voltrekt zich langs de *eigenlijn* $E^r(Q)$, opgespannen door de andere eigenvector η_3 die met λ_3 correspondeert. Er volgt

(7.5) $$x_r = b\ \exp(\gamma t)\eta_3, \quad x_r \in E^r(Q) \ .$$

In analogie met, en als uitbreiding op de eerder besproken indeling van figuur 15, definieert de gecombineerde lokale toestandsbeweging $x = x_c + x_r$ een *zadel-spiraal* Q. Dus, voor een positieve (negatieve) waarde van γ wordt Q gekenmerkt door expansie (contractie) langs de lijn E^r en contractie (expansie) in het vlak E^c.

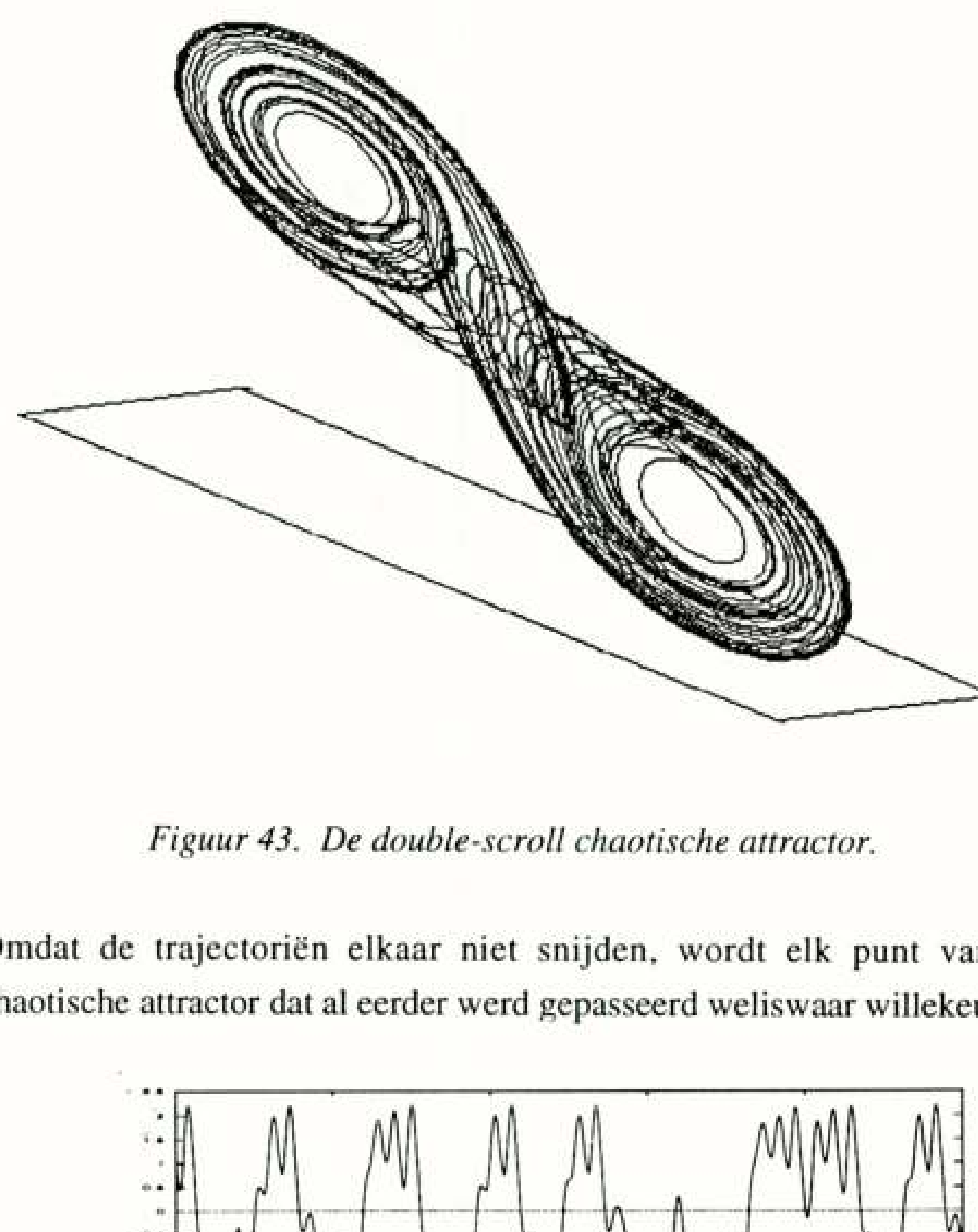
Figuur 42 geeft een schets van de eigenruimten met zadel-spiralen (vergelijk figuur 41). In overeenstemming met (7.3), zijn de circuit-parameters zó gekozen dat $\sigma_1 = \sigma_2 > 0$ en $\gamma_1 = \gamma_2 < 0$ ($Q_{1,2}$), terwijl $\sigma_0 < 0$ en $\gamma_0 > 0$ (Q_0).

De lokale structuur van figuur 42 is onderdeel van de *globale* dynamica die zich in de toestandsruimte voltrekt. Naar blijkt, tekent zich daar na enige tijd een begrensd geometrisch object af, waarnaar de trajectoriën vanuit een willekeurige begintoestand worden aangetrokken, en waarbinnen zich chaotisch gedrag afspeelt. Deze *chaotische attractor* is karakteristiek voor de autonome oscillator van Chua, en staat naar de



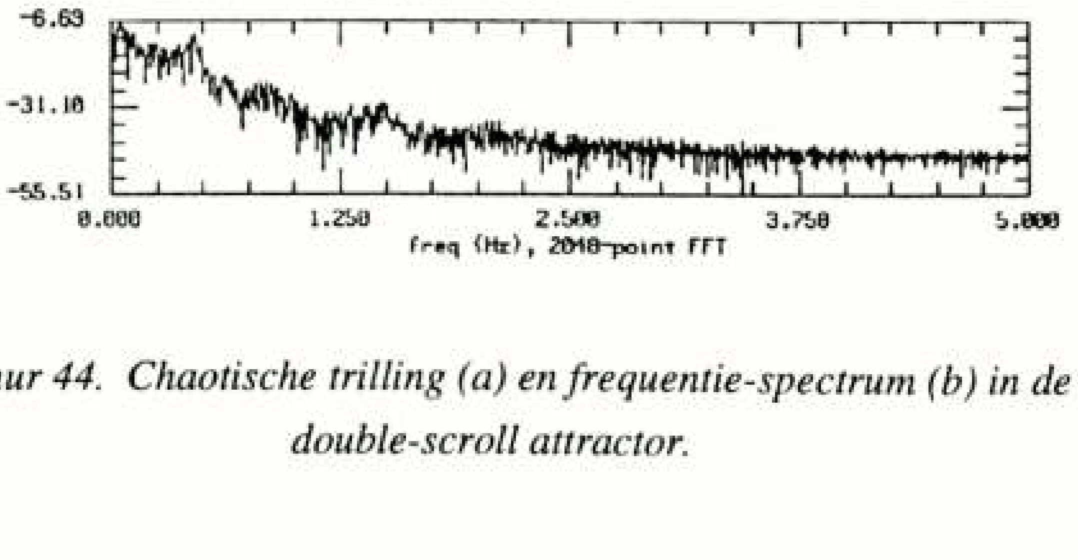
Figuur 42. Eigenruimten met zadel-spiralen.

vorm bekend als de *double-scroll*. Figuur 43 toont een computersimulatie. Metingen aan het circuit zijn er volledig mee in overeenstemming.



Figuur 43. De double-scroll chaotische attractor.

Omdat de trajectoriën elkaar niet snijden, wordt elk punt van de chaotische attractor dat al eerder werd gepasseerd weliswaar willekeurig

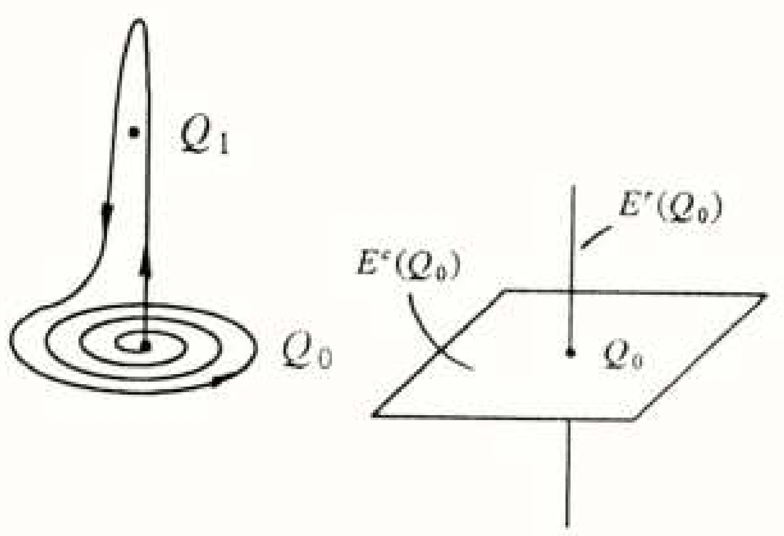


Figuur 44. Chaotische trilling (a) en frequentie-spectrum (b) in de double-scroll attractor.

vaak in de buurt, maar nooit zelf opnieuw bezocht. Figuur 44 toont de u_1-component van zo'n aperiodieke trajectorie als functie van de tijd, samen met het frequentie-spectrum ervan.

Zoals elke chaotische attractor, heeft de double-scroll de geometrische structuur van een *fractal*. Enerzijds past de attractor niet in een twee-dimensionale ruimte, maar heeft anderzijds te veel 'gaten' om drie dimensies geheel op te vullen: de gebroken dimensie is een getal dat ligt tussen 2 en 3.

De complexe structuur van de fractal blijkt het gevolg van het steeds *herhalen* van een op zichzelf *eenvoudig* voorschrift. Bedoeld algoritme staat onder regie van een *homocline* baanbeweging, zoals die ontstaat als een trajectorie zichzelf sluit via een zadel-spiraal (een *homoclien punt*). (N.B. Het begrip homocliniciteit is afkomstig van H. Poincaré, die ook al inzag dat dit een zeer complex gedrag impliceert [25].) De homocline baan komt tot stand doordat er een *ander* instabiel punt is dat de baan na vertrek vanuit het homocline punt er weer naar terug buigt. Figuur 45 schetst de situatie voor de double-scroll attractor. Daarin is de oorsprong x_{Q0} het homocline punt, terwijl x_{Q1} ervoor zorgt dat de trajectorie weer teruggebogen wordt; vergelijk figuur 42. (De puntsymmetrische tweede homocline baan vanuit x_{Q0} is niet weergegeven.)



Figuur 45. Homocline baan binnen de double-scroll. Q_0 is het homocline punt; Q_1 zorgt voor het terugbuigen.

Elke homocline baan verenigt zowel een samentrekkende, uitzettende (strekken) als een terugbuigende (vouwen) beweging. Deze baankarakteristieken kunnen worden afgebeeld op een geschikt gekozen twee-dimensionale Poincaré-doorsnede nabij Q_0. Onder de hierna te noemen voorwaarde blijkt die afbeelding vertaald te kunnen worden als het *vouw en strek* voorschrift van de eerder genoemde, maar ook nu niet nader toegelichte twee-dimensionale *hoefijzer-afbeelding* van Smale. Het herhaald toepassen ervan voert tot de geometrische essentie van het chaotische gedrag binnen de double-scroll attractor.

De aanwezigheid van de hoefijzer-afbeelding blijkt verzekerd als in het *homocline* punt x_{Q0} is voldaan aan de volgende *ongelijkheid van Shil'nikov*

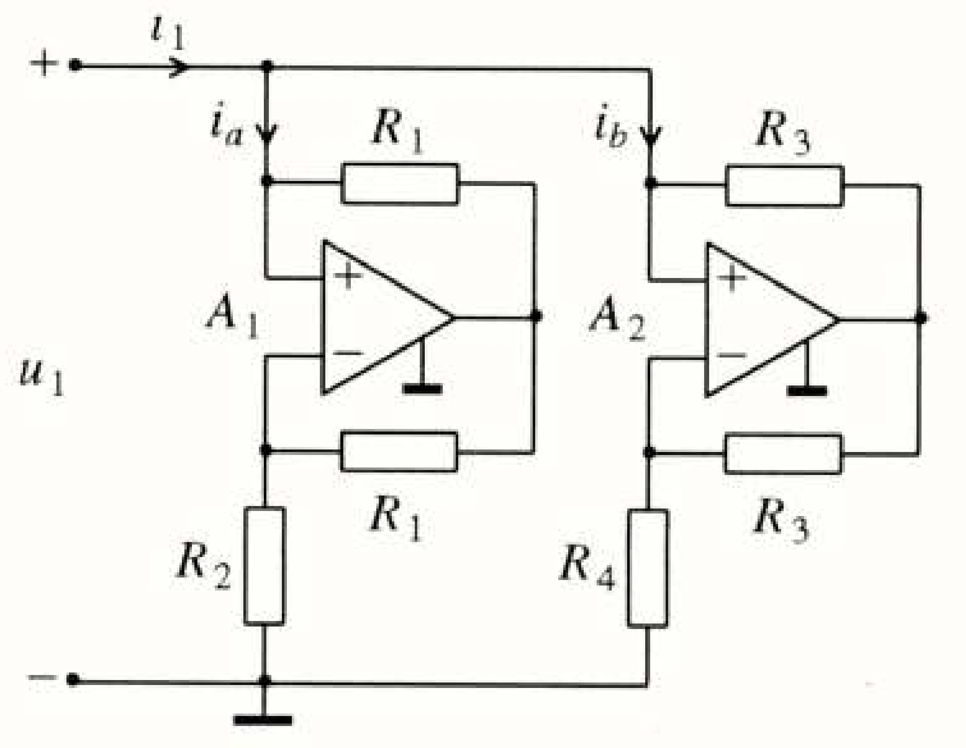
(7.6) $$\gamma_0 > |\sigma_0| \ ,$$

waarmee tot uitdrukking wordt gebracht dat de baansnelheid langs de lijn $E^r(Q_0)$ groter is dan de radiale snelheid in het vlak $E^c(Q_0)$. Tot op heden is het criterium (7.6) de sterkste indicator voor chaos. (N.B. De voorwaarde blijkt noodzakelijk voor chaotisch gedrag maar is *niet* voldoende; het is niet gezegd dat het hoefijzer een experimenteel waarneembare attractor impliceert.)

Naast de gebroken dimensie, kan een chaotische attractor ook worden gekarakteriseerd door zijn *Lyapunov-exponenten*. Dit zijn gegeneraliseerde eigenwaarden, die de gemiddelde exponentiële groeisnelheden op drie hoofdassen meten. De double-scroll attractor heeft één *positieve* Lyapunov-exponent, duidend op de gevoelige afhankelijkheid van de begintoestand.

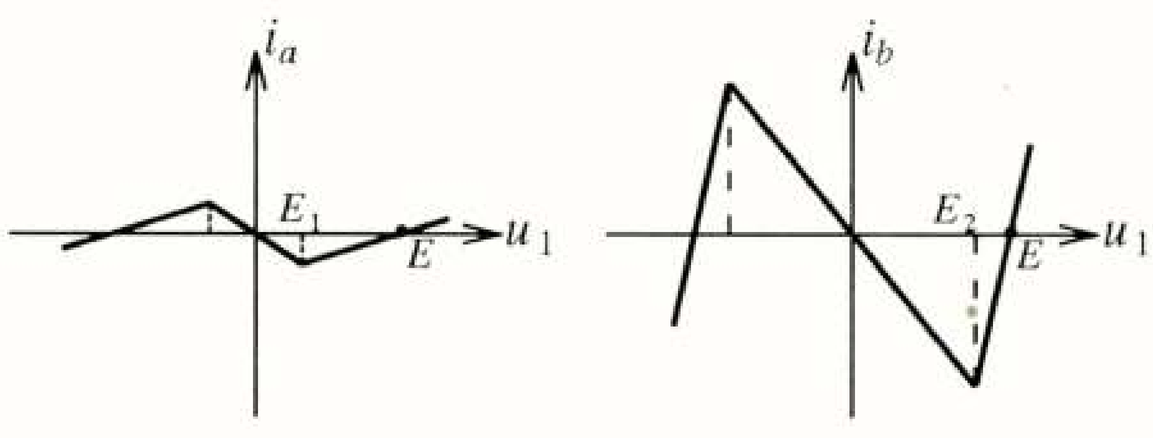
7.3 Realisatie

In figuur 46 staat een ontwerpschema voor de niet-lineaire weerstand in de oscillator van Chua [10], [37]. Het is een parallel verbinding van twee identieke op-amp configuraties met verschillende instelweerstanden.



Figuur 46. Op-amp realisatie van de niet-lineaire weerstand in de oscillator van Chua.

Bij een geschikte keuze van de instelweerstanden, worden de *u-i*-karakteristieken van de samenstellende op-amp configuraties gegeven door figuur 47.



Figuur 47. u-i-karakteristieken van de samenstellende op-amp configuraties.

In het lineaire gebied functioneert elke op-amp als een negatieve resistantie convertor. Dit geeft de segmenten met een negatieve helling. Op de aansluitende segmenten met een positieve helling verkeren de op-amps in verzadiging (in de figuur is E de verzadigingsspanning). En, omdat parallel verbinden niets anders is dan het optellen van stromen bij dezelfde spanning, wordt direkt ingezien dat de realisatie van figuur 46 inderdaad de gewenste stuksgewijs affiene *u-i*-karakteristiek van figuur 41 oplevert.

De overige elementen in het circuit van figuur 40 zijn standaard verkrijgbaar. Hieronder staat een volledige lijst van componenten waarmee een robuuste oscillator van Chua kan worden gebouwd (zie [37] voor details). De weerstand R in figuur 40 is regelbaar uitgevoerd.

De trillingseigenschappen van de oscillator worden zichtbaar als de condensatorspanningen u_1 en u_2 respectievelijk worden aangesloten op het X en Y kanaal van een storage-oscilloscoop. Vanaf de maximale waarde van R, wordt bij het geleidelijk omlaag regelen een opeenvolging van bifurcaties waargenomen: vanaf een evenwichtspunt via een Hopf-

Lijst van componenten voor de autonome oscillator van Chua

Element	Beschrijving	Waarde	Tolerantie
$A_{1,2}$	op-amp ($\frac{1}{2}$AD 712, TL082 of equivalent)		
R_1	$\frac{1}{4}$W weerstand	22 kΩ	± 5%
R_2	$\frac{1}{4}$W weerstand	3,3 kΩ	± 5%
R_3	$\frac{1}{4}$W weerstand	220 Ω	± 5%
R_4	$\frac{1}{4}$W weerstand	2,2 kΩ	± 5%
C_1	condensator	10 nF	± 5%
R	potentiometer	2 kΩ	± 5%
C_2	condensator	100 nF	± 5%
L	spoel (TOKO type 10RB of equivalent)	18 mH	± 10%

bifurcatie naar een limit-cycle, om vervolgens via periode-verdubbeling tot een chaotische spiraal-attrractor te geraken, waarna via periodieke vensters en verdere periode-verdubbeling de double-scroll attractor zichtbaar wordt.

Als alternatief kan in plaats van R, C_1 als bifurcatie-parameter dienen. In dat geval moet bij een vaste waarde van $R = 1800\Omega$, de condensator van 12 nF naar 6 nF worden terug geregeld om hetzelfde bifurcatie-scenario als hierboven te zien passeren. Een bijkomend voordeel is dat gedurende het omlaag regelen van de condensator, de figuren op het beeldscherm ongeveer dezelfde afmetingen houden (bij verlaging van R worden die afmetingen steeds kleiner: de afstand tussen de evenwichtspunten Q_1 en Q_2 in figuur 41 neemt af).

De besproken op-amp realisatie is slechts één van de vele mogelijkheden. Recentelijk zijn daar ook chip realisaties in CMOS bijgekomen [12]. Er kunnen dan twee verschillende ontwerp strategieën worden onderscheiden. Bij de éne aanpak worden de toestandsvergelijkingen (7.1) als bij een analoge computer geïmplementeerd middels integratoren, enz. Bij de andere opzet wordt uitgegaan van het circuit zelf, terwijl de inductiviteit eerst via een gyrator wordt nagebootst om op zijn beurt te worden gerealiseerd met operationele transconductantie versterkers (OTA's).

8. CONCLUSIES

Realistische modellen zijn over het algemeen zowel niet-lineair als dynamisch. Anders dan de naam suggereert, vertonen de daarmee verbonden chaotische verschijnselen een intrigerende ordening en zijn in het geheel niet 'vreemd'. Integendeel: in de natuur lijken ze eerder regel dan uitzondering. Binnen de elektrotechniek is parasitaire chaos onder meer gerapporteerd in phase-locked loops, synchronisatie circuits, digitale filters en switched-capacitor circuits.

Voor elektronici is het in de eerste plaats van belang om chaotisch gedrag te herkennen, zowel bij experimenten als bij simulaties. Dan wordt in elk geval voorkomen dat een ontwerp op onjuiste gronden wordt verworpen. Bovendien kan het verlopen van één of meerdere circuit-parameters de oorzaak zijn dat een eerder goed functionerend circuit alsnog in chaos geraakt.

De besproken bifurcatiewegen naar chaos kunnen behulpzaam zijn. Daarbij kwam naar voren dat verlies van synchronisatie en het ontstaan van subharmonische trillingen aanwijzingen zijn voor mogelijk chaotisch gedrag.

Daar waar het vroegere onderzoek in de niet-lineaire dynamica werd gekenmerkt door analytische benaderingstechnieken, toegespitst op het verkrijgen van één enkele oplossing, ligt thans de nadruk op geometrische, kwalitatieve methoden. Computer experimenten verschaffen de nodige intuïtie, en stimuleren de wiskundige bewijsvoering. Lopende onderzoeksthema's als (gekoppelde) oscillators, sigma-delta modulators, neurale netten, enz. krijgen thans een nieuwe impuls.

Het praktische chaos onderzoek staat in de kinderschoenen. Tot voor kort was het vrijwel exclusief beperkt tot het voorspellen en beheersen van ongewenste chaotische trillingen. Thans komen evenwel tevens toepassingen van het intentioneel gebruik van chaos in beeld. Als voorbeeld geldt het onderzoek naar beveiligde communicatie, waar de informatie wordt verstopt in een chaotisch signaal. De synchronisatie tussen zender en ontvanger, beide toegerust met een identiek chaotisch circuit, moet er voor zorgen dat de informatie wordt teruggewonnen. De ontcijferingssleutel wordt geleverd door de circuit-parameters (zie [38] voor een overzicht van lopend onderzoek).

De auteur dankt Ir. N.H. Waning voor het maken van de figuren en het uitvoeren van de computer berekeningen. Er werd gebruik gemaakt van het software pakket INSIDE [39].

Literatuur

[1a] Pol, B. van der, De amplitude van vrije en gedwongen triode-trillingen, *Tijdschr. Ned. Radiogenootschap*, Deel I (1920), blz. 3–31.

[1b] Pol, B. van der, Trillinghysteresis bij een triode-generator met twee graden van vrijheid, *Tijdschr. Ned. Radiogenootschap*, Deel I (1921), blz. 125–147.

[1c] Pol, B. van der, Gedwongen trillingen in een systeem met niet-lineairen weerstand, *Tijdschr. Ned. Radiogenootschap*, Deel II (1924), blz. 57–73.

[1d] Pol, B. van der, Over "relaxatie-trillingen", *Tijdschr. Ned. Radiogenootschap*, Deel III (1926), blz. 25–40.

[1e] Pol, B. van der, Over "relaxatie-trillingen" (II), *Tijdschr. Ned. Radiogenootschap*, Deel III (1927), blz. 94–105.

[1f] Mark, J. van der en Balth. v.d. Pol, Het opwekken van sinusoïdale trillingen met een trillingstijd, bepaald door een relaxatietijd, *Tijdschr. Ned. Radiogenootschap*, Deel VI (1934), blz. 79–90.

[2a] Elias, G.J. en H. Miedema, Enige trillingsverschijnselen in een niet-lineair circuit, *Tijdschr. Ned. Radiogenootschap*, Deel XI (1946), blz. 141–171.

[2b] Elias, G.J., Over schakelingen met niet-lineaire karakteristiek, *Tijdschr. Ned. Radiogenootschap*, Deel XIII (1948), blz. 37–50.

[2c] Elias, G.J. en S. Duinker, Enige theoretische beschouwingen en experimenten over trillingsverschijnselen in circuits met niet-lineaire elementen, *Tijdschr. Ned. Radiogenootschap*, Deel XIV (1949), blz. 163–191.

[2d] Elias, G.J. en Duiker, S., Trillingsverschijnselen in een circuit met gebroken lineaire karakteristiek, *Tijdschr. Ned. Radiogenootschap*, Deel XV (1950), blz. 79–91.

[2e] Elias, G.J., S. Duinker en Tan Soen Hong, Over de invloed van de inschakelhoek bij het opwekken van subharmonische trillingen in een niet-lineair circuit, *Tijdschr. Ned. Radiogenootschap*, Deel XVI (1951), blz. 69–84.

[3] Balthasar van der Pol, *Selected Scientific Papers*, H. Bremmer and C.J. Boukamp (eds.), North-Holland, Amsterdam, 1960.

[4] Chua, L.O., C.A. Desoer and E.S. Kuh, *Linear and Nonlinear Circuits*, McGraw-Hill, New York, 1987.

[5] Neerhoff, F.L., *Elektrische Circuits, model, structuur en dynamica*, deel 1, DUM, Delft, 1992.

[6] Unbehauen, R., *Grundlagen der Elektrotechnik*, Band 2, Springer-Verlag, Berlin, Vierte Aufiage, 1994.

[7] Hasler, M. and J. Neirynck, *Nonlinear Circuits*, Artech House, Inc., Norwood, 1986.

[8] *Proc. IEEE*, Special Issue on Chaotic Systems, aug. 1987.

[9] *IEEE Trans. Circuits and Systems*, Special Issue on Chaos and Bifurcations of Circuits and Systems, vol. 35, no. 7, 1988.

[10] *IEEE Trans. Circuits and Systems*, I: Fundamental Theory and Applications, Special Issue on Chaos in Nonlinear Electronic Circuits, Part A. Tutorials and Reviews, vol. 40, no. 10, 1993.

[11] *IEEE Trans. Circuits and Systems*, I: Fundamental Theory and Applications, Special Issue on Chaos in Nonlinear Electronic Circuits, Part B. Bifurcations and Chaos, vol. 40, no. 11, 1993.

[12] *IEEE Trans. Circuits and Systems*, II: Analog and Digital Signal Processing, Special Issue on Chaos in Nonlinear Electronic Circuits, Part C. Applications, vol. 40, no. 10, 1993.

[13] Gleick, J., *Chaos, making a new science*, Viking Penguin Inc., New York, 1987.

[14] Moon, F.C., *Chaotic Vibrations, An Introduction for Applied Scientists and Engineers*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1987.

[15] Thompson, J.M.T. and H.B. Steward, *Nonlinear Dynamics and Chaos*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 1987.

[16] Devaney, R.L., *An Introduction to Chaotic Dynamical Systems*, Addison-Wesley Publ. Comp., Inc., 1987.

[17] Jordan, D.W. and P. Smith, *Nonlinear Ordinary Differential Equations*, Clarendon Press, Oxford, sec. ed., 1987.

[18] Hale, J. and H. Kocak, *Dynamics and Bifurcations*, Springer-Verlag, New York, 1991.

[19] Wiggins, S., *Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos*, Springer-Verlag, New York, 1990.

[20] Arnold, V.I., *Geometrical Methods in the Theory of Ordinary Differential Equations*, Springer-Verlag, New York, sec. ed., 1988.

[21] Chua, L.O. and G. Zhong, 'Negative Resistance Curve Tracer', *IEEE Trans. Circuits and Systems*, vol. CAS–32, no. 6, pp. 569–582, 1985.

[22] Chua, L.O. and F. Ayron, 'Designing nonlinear single op-amp circuits: a cookbook approach', *Int. Journ. Cir. Theory Appl.*, 13, pp. 235–268, 1985.

[23] Glass, L. and M.C. Mackey, *From Clocks to Chaos, The Rhythms of Life*, Princeton Univ. Press, Princeton, 1988.

[24] Kennedy, M.P. and L.O. Chua, 'Hysteresis in electronic circuits: A circuit theorist's perspective', *Int. Journ. Cir. Theory Appl.*, vol. 9, no. 5, pp. 471–515, 1991.

[25] Poincaré, H., *Les Methodes Nouvelles de la Mécanique Celeste*, 3 Vols. Gauthier-Villars, Paris, 1892, 1893, 1894, reprinted by Dover, New York, 1957.

[26] Rayleigh Lord, *The Theory of Sound*, 1896, reprinted by Dover, New York, 1945.

[27] Perfetti, R., 'Piecewise-Linear Analysis of the Wien Bridge Oscillator', *Int. Journ. Cir. Theory Appl.*, vol. 22, pp. 341–356, 1994.

[28] Duffing, G., 'Erzwungene Schwingungen bei Veränderlicher Eigenfrequenz', *Vieweg: Braunschweig*, 1918.

[29] Hayashi, C., *Nonlinear Oscillations in Physical Systems*, McGraw-Hill, New York, 1964.

[30] Ueda, Y., 'Random Phenomena Resulting from Nonlinearity in the System described by Duffing's Equation', *Int. J. Non-linear Mechanics*, vol. 20, no. 5/6, pp. 481–491, 1985 (translated from *Trans. of the Inst. Electr. Eng. of Japan*, vol. A98, March 1978).

[31] Kennedy, M.P. and L.O. Chua, 'Van der Pol and Chaos', *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS–33, pp. 974–980, 1986.

[32] Cartwright, M.L. and J.E. Littlewood, 'On non-linear differential equations of the second order: I. The equation $y'' - k(1-y^2)y' + y = b\lambda k \cos(\lambda t + \alpha)$, k large', *J. London Math. Soc.*, Vol. 20, pp. 180–189, 1945.

[33] Levinson, N., 'A second order differential equation with singular solutions', *Ann. Math.*, Vol. 50, pp. 127–153, 1949.

[34] Smale, S., 'Differentiable dynamical systems', *Bull. Amer. Math. Soc.*, vol. 73, pp. 747–817, 1967.

[35] Parker, T.S. and L.O. Chua, 'A computer-assisted study of forced relaxation oscillations', *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS–30, pp. 518–533, 1983.

[36] Chua, L.O., 'The genesis of Chua's circuit', *Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik*, vol. 46, no. 4, pp. 250–257, 1992.

[37] Kennedy, M.P., 'Robust op-amp realization of Chua's circuit', *Frequenz*, vol. 46, no. 3–4, Mar.-Apr. 1992.

[38] Madan, R.N. (ed.), *Chua's Circuit: A Paradigm for Chaos*, World Scientific, Singapore, 1993.

[39] Parker, T.S. and L.O. Chua, *Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems*, Springer-Verlag, New York, 1989.

***

Overdruk

B. van der Pol and J. van der Mark, 'Frequency Demultiplication', *Nature*, no. 3019, vol. 120, pp. 363–364, 1927.

Frequency Demultiplication.

It is a well-known fact that when a sinusoidal E.M.F. (of the form $E_0 \sin \omega t$) is available, it is a relatively simple matter to design an electrical system such that alternating currents or potential differences will occur in the system, having a frequency which is a whole multiple of the applied E.M.F., *e.g.* 2ω, 3ω, etc. For example, when the E.M.F. $E_0 \sin \omega t$ is applied to a diode-rectifier, the current in the anode circuit will include a component of double frequency, *i.e.* 2ω. This is therefore one method of frequency multiplication. Several other methods could easily be mentioned.

Now we found it is also possible to design an electrical system such that when the above-mentioned

E.M.F., $E_0 \sin \omega t$, is applied to it, currents and potential differences occur in the system the frequencies of which are whole submultiples of the frequency of the applied E.M.F., *e.g.* $\omega/2$, $\omega/3$, $\omega/4$ up to $\omega/40$.

To this end one can make use of the remarkable synchronising properties of relaxation-oscillations,

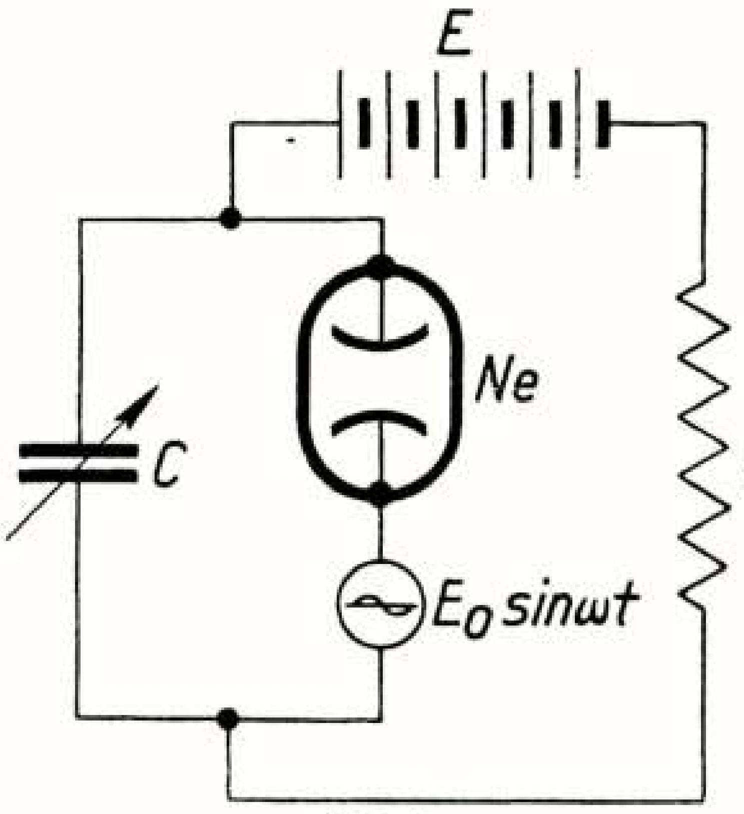


FIG. 1.

i.e. oscillations the time period of which is determined by the approximate expression $T = \pi/2\,C\,R$, a relaxation time (Balth. van der Pol, "On Relaxation Oscillations," *Phil. Mag.*, p. 978, 1926; also *Zeitschr. f. hochfreq. Technik*, **29,** 114; 1927).

Let *Ne* in Fig. 1 represent a neon glow lamp, *R* a resistance of the order of a few megohms, *C* a variable condenser of approximately maximum 3500 cm. capacity and *E* a battery of say 200 volts. In the absence of the E.M.F. $E_0 \sin \omega t$, this system will oscillate with a time period $T = \alpha C R$ where α is a number of the order unity. With the E.M.F. $E_0 \sin \omega t$ present, where E_0 may be of the order of 10 volts (considerably lower voltages also give the same result) it is found that the system is only capable of oscillating with *discrete frequencies*, these being determined by *whole submultiples of the applied frequency*. For example, with $E_0 = 0$, give *C* a small value such that the natural relaxation frequency of the system is 1000 periods per second. Next apply the alternating voltage $E_0 \sin \omega t$, where ω may be made $2\pi \times 1000$ sec.$^{-1}$, then the system will go on oscillating with a frequency 1000 sec.$^{-1}$. When now the applied $E_0 \sin \omega t$ is left as before but *C* is gradually increased to a much greater value, it will be found that the system continues to oscillate with a frequency 1000 sec.$^{-1}$. If *C* is next increased still further, the frequency of the oscillations in the system (as detected, for example, with a telephone coupled loosely in some way to the system) suddenly drops to 1000/2 sec.$^{-1}$, to maintain this value over a certain range of the capacity value. If *C* is increased still more, the frequency suddenly jumps to 1000/3 sec.$^{-1}$, and so on up to 1000/40 sec.$^{-1}$. In some recent experiments it was found possible to obtain a frequency demultiplication up to the ratio 1 : 1/200. Often an irregular noise is heard in the telephone receivers before the frequency jumps to the next lower value. However, this is a subsidiary phenomenon, the main effect being the regular frequency demultiplication. It may be noted that while the production of harmonics, as with frequency multiplication, furnishes us with tones determining the musical major scale, the phenomenon of frequency-division renders the musical minor scale audible. In fact, with a properly chosen 'fundamental' ω, the turning of the condenser in the region of the third to the sixth subharmonic strongly reminds one of the tunes of a bagpipe.

In conclusion, we give in Fig. 2 the measured time periods (which are thus found to be a series of discrete subharmonics) as a function of the setting of the condenser *C*. The dotted line in the figure gives the frequency with which the system oscillates in the absence of the applied alternating E.M.F. The shaded parts correspond to those settings of the condenser where an irregular noise is heard. In the actual experiment the resistance *R* was, for ease of adjustment, replaced by a diode. The experiment, however, succeeds just as well with an ohmic resistance *R*. Obviously the same experiment succeeds with all systems capable of producing relaxation-oscillations such as described in the papers quoted.

BALTH. VAN DER POL.
J. VAN DER MARK.
Natuurkundig Laboratorium der
N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken,
Eindhoven, Aug. 5.

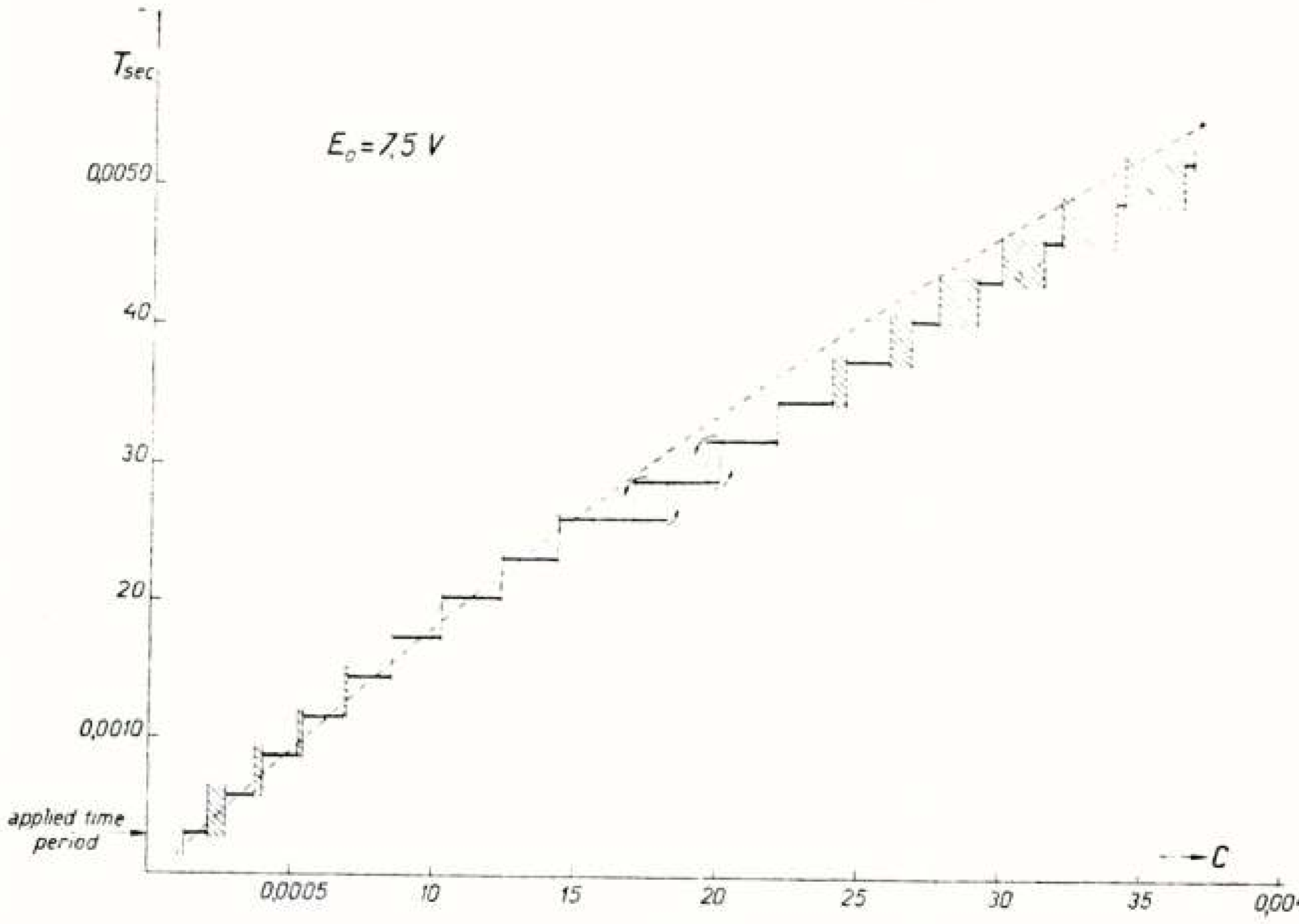
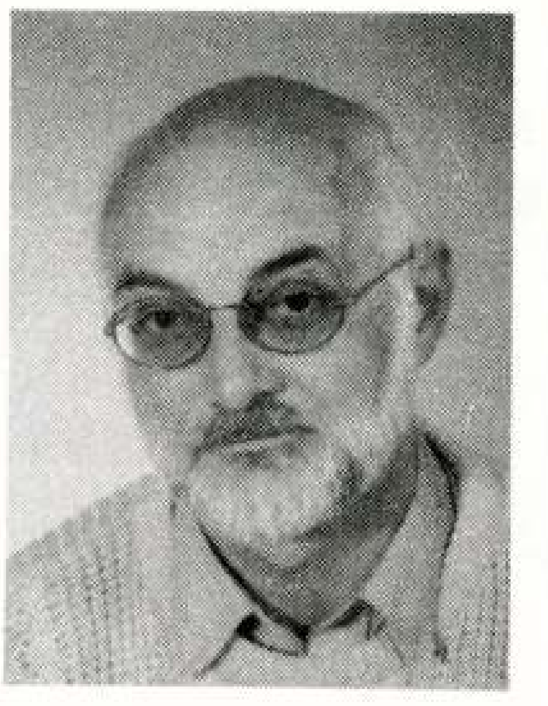


FIG. 2.

Van V-modem tot ATM-multimedia-terminal:

Ontwikkelingen in de datacommunicatie

Fred Snijders
Philips Research, Eindhoven

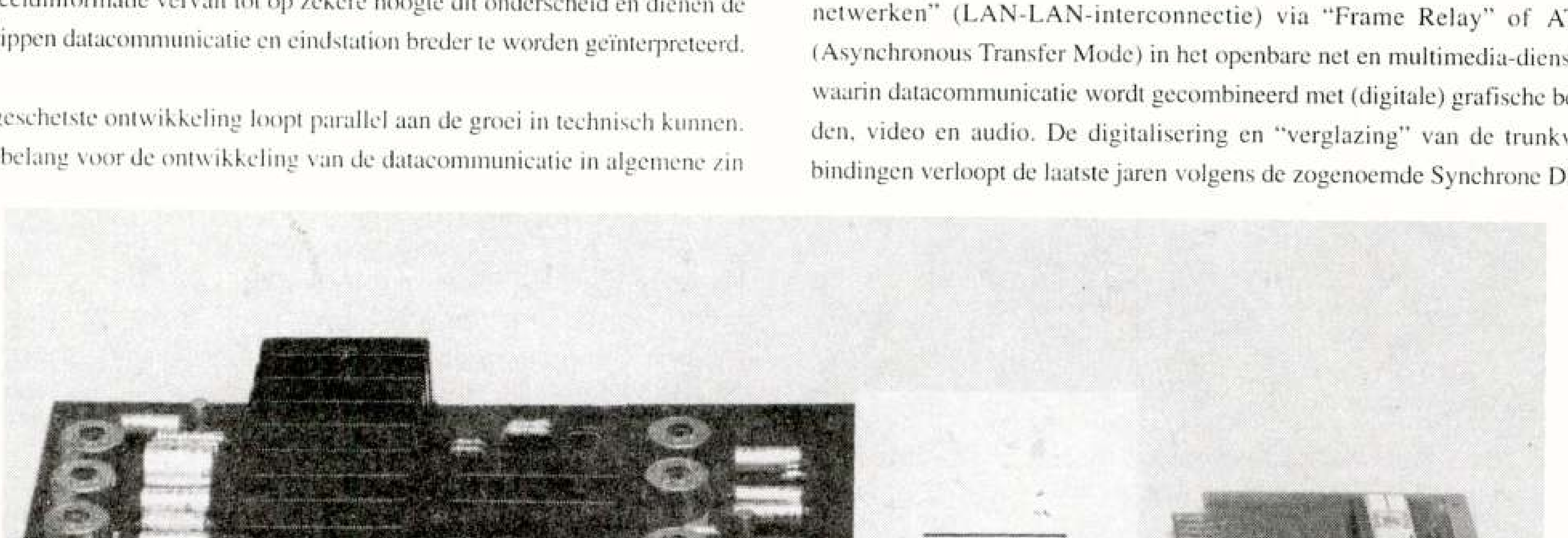


In the early days of data-communication research and development focussed on the technology of transferring digital information over bandwidth-limited channels i.e. on data-transmission. Riding the wave of a continuous improvement in the transmission quality of the media, the interest shifted to the process of the exchange of information between end-user terminals (data-communication). This survey article sketches how the art of data-communication has advanced by leaps and bounds. Starting with a review of the series of V-standards for the transmission of data via (switched) telephone networks, we will scan the emergence of specialized data-networks and "light-weight" data-communication protocols. Finally, the influence of emerging multi-media services on digital communication networks will be touched on.

Inleiding

Vanaf de jaren zestig vult literatuur over datatransmissie en datacommunicatie de technische tijdschriften. Lag in het begin de nadruk op de *datatransmissie*, dat wil zeggen op technieken voor het fysieke transport van de digitale informatie-elementen over de transmissiemedia, later verschoof het zwaartepunt van de belangstelling naar *datacommunicatie*: het proces van het uitwisselen van informatie tussen de eindgebruikers. Voorbeelden van datatransmissie-onderwerpen "van het eerste uur" zijn modulatie, egalisatie, echo-cancelling en allerhande digitale implementatievormen [1, 2, 3, 4]. Voorbeelden van datacommunicatie-onderwerpen zijn: de architectuur van de datacommunicatienetwerken, protocollen, coderings- en compressietechnieken en in toenemende mate applicaties [5, 6]. In de jaren zestig en zeventig dacht men bij het begrip "eindgebruiker" uitsluitend aan computers of computer-eindstations. Met het voortschrijden van de digitalisering van ook spraak- en beeldinformatie vervalt tot op zekere hoogte dit onderscheid en dienen de begrippen datacommunicatie en eindstation breder te worden geïnterpreteerd.

De geschetste ontwikkeling loopt parallel aan de groei in technisch kunnen. Van belang voor de ontwikkeling van de datacommunicatie in algemene zin zijn de explosieve groei in kennis van digitale signaalbewerkingstechnieken en de IC-implementatie hiervan, plus de voortdurende verbeteringen in de transmissiekwaliteit van de netwerken zelf. In de trunkverbindingen van de publieke netwerken vervingen digitale, optische glasvezelsystemen de analoge draaggolfsystemen met frequentiemultiplex van de kanalen. Dit resulteerde in netwerken met een overvloed aan bandbreedte en uitstekende transmissie-eigenschappen. Een aantal notoire problemen voor datatransmissie via de vroegere, analoge verbindingen, zoals een strikte bandbreedtebeperking van de kanalen, groeplooptijdvervorming en frequentieverschuivingen, werd hiermee geheel of gedeeltelijk geëlimineerd. Het resultaat was dat de bitsnelheid van dataverbindingen aanzienlijk kon toenemen en de kans op bitfouten daalde, zodat minder protocol-overhead voor de bescherming tegen transmissiefouten nodig was. Dit stimuleerde de ontwikkeling van "lichtere" protocollen die, samen met de hogere transmissiesnelheden, geheel nieuwe applicatiegebieden ontsloten. Voorbeelden zijn het koppelen van "local area netwerken" (LAN-LAN-interconnectie) via "Frame Relay" of ATM (Asynchronous Transfer Mode) in het openbare net en multimedia-diensten waarin datacommunicatie wordt gecombineerd met (digitale) grafische beelden, video en audio. De digitalisering en "verglazing" van de trunkverbindingen verloopt de laatste jaren volgens de zogenoemde Synchrone Digi-



Nostalgische plaatje uit de jaren zestig. Trots wordt getoond hoeveel een (analoge) 2400b/s-modem eenvoudiger en kleiner wordt, indien uitgevoerd als digitaal circuit (voorgrond: rechts). (foto Philips)

tale Hiërarchie (SDH). Het internationale standaardisatiecomité CCITT (Comité Consultatif International de Télégraphique et Téléphonique), onderdeel van de "International Telecommunications Union: ITU", heeft hiervoor aanbevelingen uitgewerkt. SDH is gebaseerd op de technologie voor synchrone, optische communicatienetwerken (SONET) die in de jaren tachtig door Bell Research Laboratories (USA) is ontwikkeld. De SONET/SDH-technologie is al op grote schaal geïntroduceerd in het hogere netvlak van communicatienetwerken voor bitsnelheden van 155 Mbit/s en hoger (tabel 1). Naar verwachting zullen begin 1997 de eerste 10Gbit/s-systemen (STM-64) in de trunknetwerken van PTT's worden geïntroduceerd. SDH zal in de 2e helft van de jaren negentig de dominante transmissiestandaard zijn en als "drager" dienen voor de datastromen van het ATM-gebaseerde breedband ISDN.

SDH Interface	***Bitsnelheid***
STM-1	155,520 Mbit/s
STM-4	622,080 Mbit/s
STM-16	2488,320 Mbit/s
STM-64	9953,280 Mbit/s

Tabel 1

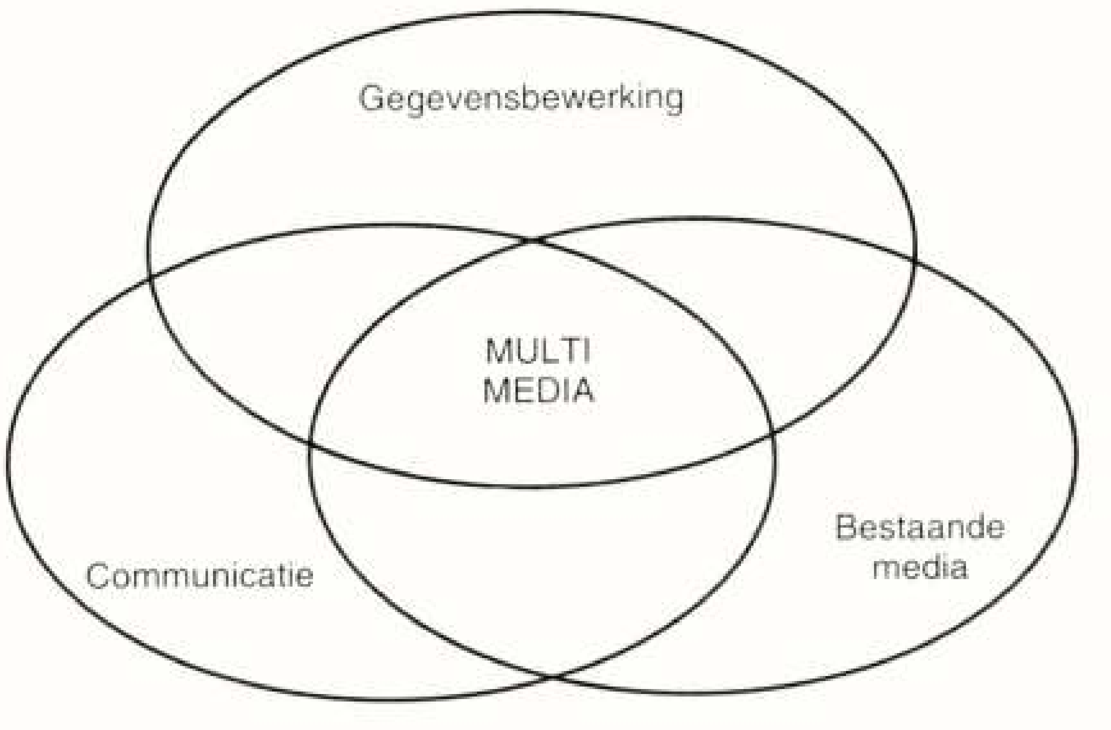


Communicatie is een niet meer weg te denken element van onze moderne samenleving. (foto Ericsson)

Recentelijk is het begrip *informatiesnelweg* ("Information Super Highway") die vroeger onder de meer prozaïsche naam van "Broadband Integrated Services Digital Network" (B-ISDN) door het leven moest, in de belangstelling gekomen. Ook voor het B-ISDN heeft CCITT "aanbevelingen" met de kracht van standaards ontwikkeld. In 1988 koos CCITT ATM als communicatieprotocol voor het B-ISDN. CCITT-aanbeveling I.121 beschrijft ATM als voorkeursoplossing voor een uniform, diensten-georiënteerd netwerk. De implicaties hiervan zullen we in de loop van dit artikel in meer detail behandelen. Sedertdien zijn een hele serie aanbevelingen tot stand gekomen met name op het gebied van de ATM adaptatielagen (AAL). Naast CCITT is ook het ATM-Forum, een samenwerkingsverband van bedrijven en gebruikers, actief bezig standaards te ontwikkelen voor datacommunicatie via ATM. Het zijn met name de activiteiten van het ATM-forum die de laatste jaren tot praktische toepassingen van het ATM-concept hebben geleid.

Het begrip *Informatiesnelweg* wordt meestal in een adem genoemd met *MultiMedia*. Multimedia wordt vaak gedefinieerd als diensten waarin twee of meer communicatiemedia (audio, video, data, tekst, grafiek, foto's) zijn gecombineerd.

Deze definitie volgend sluiten we ook omroeptelevisie (video en audio) en kranten (tekst en foto's) in wat niet overeenkomt met het heersende gevoel dat multimedia een innovatieve combinatie is van de nieuwste ontwikkelingen op het gebied van de communicatie- en computertechnologie met elementen van bestaande (elektronische) media (figuur 1).



Figuur 1: Multimedia is een innovatieve combinatie van de nieuwste ontwikkelingen in de communicatie- en computertechniek met elementen

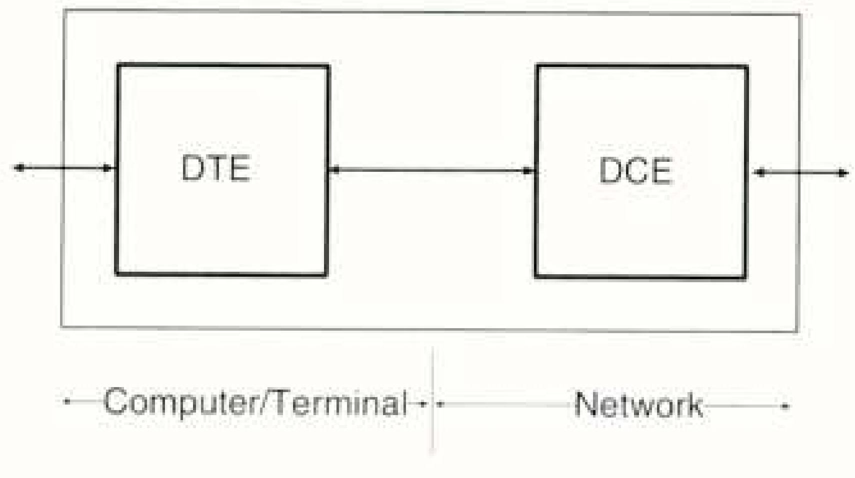
De verwachte invloed van de multimedia-ontwikkeling op de groei van het digitale verkeer op communicatienetwerken is aanzienlijk. Een eerste, voorzichtige vingeroefening met "genetwerkte" multimediadiensten en toepassingen zien we op *Internet* waarvan zowel professionele instellingen als enthousiaste particulieren gebruik maken voor het uitwisselen van informatie.

In dit artikel zullen we in vogelvlucht de ontwikkeling van de datacommunicatie volgen. Ons pad zal lopen van de V-modem van het eerste uur tot de communicatieaspecten van een op ATM gebaseerd breedband ISDN. Hoofdstuk 2 behandelt de zogenoemde V-standaards voor datatransmissie over het publieke telefoonnet. Hierbij zal onder andere worden ingegaan op compressie als techniek om (gemiddeld) de effectieve bitsnelheid van datamodems op te voeren; een techniek die inmiddels ook voor data-opslag toepassing heeft gevonden. Hoofdstuk 3 gaat in op "pakketschakelende" datacommunicatiediensten en communicatieprotocollen als X.25, Frame Relay en ATM. In hoofdstuk 4 zal aandacht worden besteed aan de ontwikkeling van de "Informatiesnelweg" en de verschuiving in de communicatiebehoefte naar combinaties van data, beeld en geluid ("multi-media").

V-standaards

Computers en computerterminals worden verbonden via zogenoemde com-

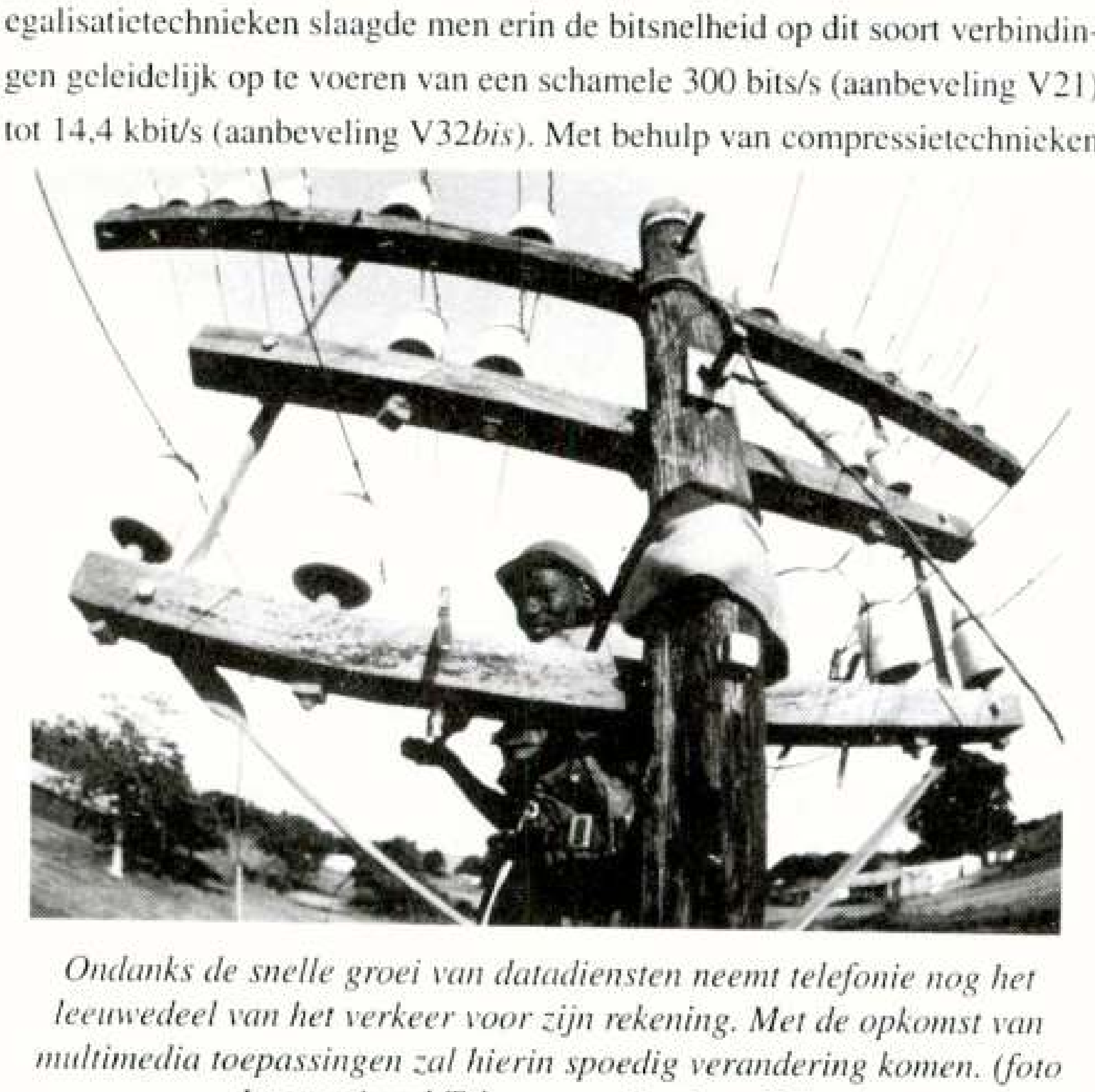
municatie-interfaces[1]. Standaardisatie-organisaties onderscheiden hierbij de DCE ("data circuit terminating equipment") aan de netwerkkant en de DTE ("data terminal equipment") aan de computer/terminalkant. (figuur 2). Functioneel vormt de DTE onderdeel van het computer- of terminalsysteem en



Figuur 2: Communicatie-interfaces bestaan uit een DTE ("data terminal equipment") en een DCE ("data circuit terminating equipment").

wordt aangestuurd door de communicatiecontroller (hardware en software) hiervan. De DCE verzorgt de aanpassing van de digitale tekens aan de specifieke transmissie-eigenschappen van het communicatienetwerk. De DTE- en DCE-functie behoeven niet fysiek gescheiden te zijn maar kunnen in één apparaat zijn ondergebracht.

Voor datacommunicatie over het telefoonnetwerk heeft men de V-serie CCITT-aanbevelingen ontwikkeld. Vóór de digitalisering van het telefoonnetwerk, die voornamelijk in de jaren tachtig zijn beslag heeft gekregen, bestond dit netwerk uit een fysiek aderpaar tussen abonnee en eindcentrale en frequentiegemultiplexte spraakcircuits van beperkte bandbreedte tussen de centrales onderling. Deze situatie kenmerkte zich vooral door de beperkte bandbreedte (een spraakcircuit in een draaggolfsysteem had een bandbreedte van 300-3400 Hz). Ook looptijdvervorming, impuls- en thermische ruis en de (mogelijke) frequentieverschuiving die in de FDM-apparatuur door de lokale modulatoren en demodulatoren werd geïntroduceerd, waren "hobbels" in het communicatiekanaal die door de DCE ("modem") moesten worden genomen. De DCE diende de bits te converteren naar een signaalvorm die zich over dergelijke spraakcircuits liet transporteren zonder desastreuze tekenvervorming op te lopen en met voldoende discriminatiemarge ten opzichte van de ruis. Hiervoor ontwikkelde men ingenieuze modulatiemethoden. Gebruik makend van steeds verfijndere vormen van modulatie- en egalisatietechnieken slaagde men erin de bitsnelheid op dit soort verbindingen geleidelijk op te voeren van een schamele 300 bits/s (aanbeveling V21) tot 14,4 kbit/s (aanbeveling V32*bis*). Met behulp van compressietechnieken



Ondanks de snelle groei van datadiensten neemt telefonie nog het leeuwedeel van het verkeer voor zijn rekening. Met de opkomst van multimedia toepassingen zal hierin spoedig verandering komen. (foto International Telecommunications Union)

zijn nog hogere effectieve datasnelheden mogelijk.

Tabel 2 geeft een overzicht van de V-serie CCITT-aanbevelingen. Deze aanbevelingen normaliseren een aantal fundamentele kenmerken van de modem(s) zoals bitsnelheden, modulatiemethoden en de polynomen van scramblers, die in veel modems nodig zijn om voldoende klokinformatie in het signaal te kunnen garanderen. Ook formuleren deze en andere aanbevelingen uit de V-serie minimum transmissie-eigenschappen van het kanaal. Door deze kenmerken vast te leggen kan apparatuur van verschillende modemfabrikanten (in principe) samenwerken. In de begintijd van de datatransmissie waren er nogal wat problemen met de onderlinge compatibiliteit, vaak veroorzaakt door verschillen in bandbreedte en flanksteilheid van de filters. Deze problemen zijn echter gaandeweg opgelost. Opgemerkt moet worden dat de aanbevelingen zich niet uitspreken *hoe* een en ander dient te worden geïmplementeerd. Ze laten dus ruimte voor modemfabrikanten om zich qua prijs/prestatieverhouding van hun produkten te profileren.

CCITT-aanbeveling	**Bitsnelheid (bits/s)**	**Modulatie-methode**	**Type kanaal/ bijzonderheden**
V21	300	FSK	duplex, 2w-PSTN
V23	600/1200	FSK	duplex, 2w-PSTN
V26	2400	4PSK	4w-LL
V27	4800	8PSK	4w-LL, manuele egalisator
V27*bis*	2400/4800	8PSK	4w-LL, automatische egalisator
V27*ter*	2400/4800	8PSK	duplex, 2w-PSTN
V29	9600	4PSK/4AM	4w-LL
V32	9600	4PSK/4AM	2w-PSTN, duplex
V32*bis*	14400	4PSK/4AM	2w-PSTN, duplex

PSTN: geschakelde telefoonnet ("public switched telephone network")
LL : huurlijn ("leased line")
2w : tweedraads
4w : vierdraads

Tabel 2

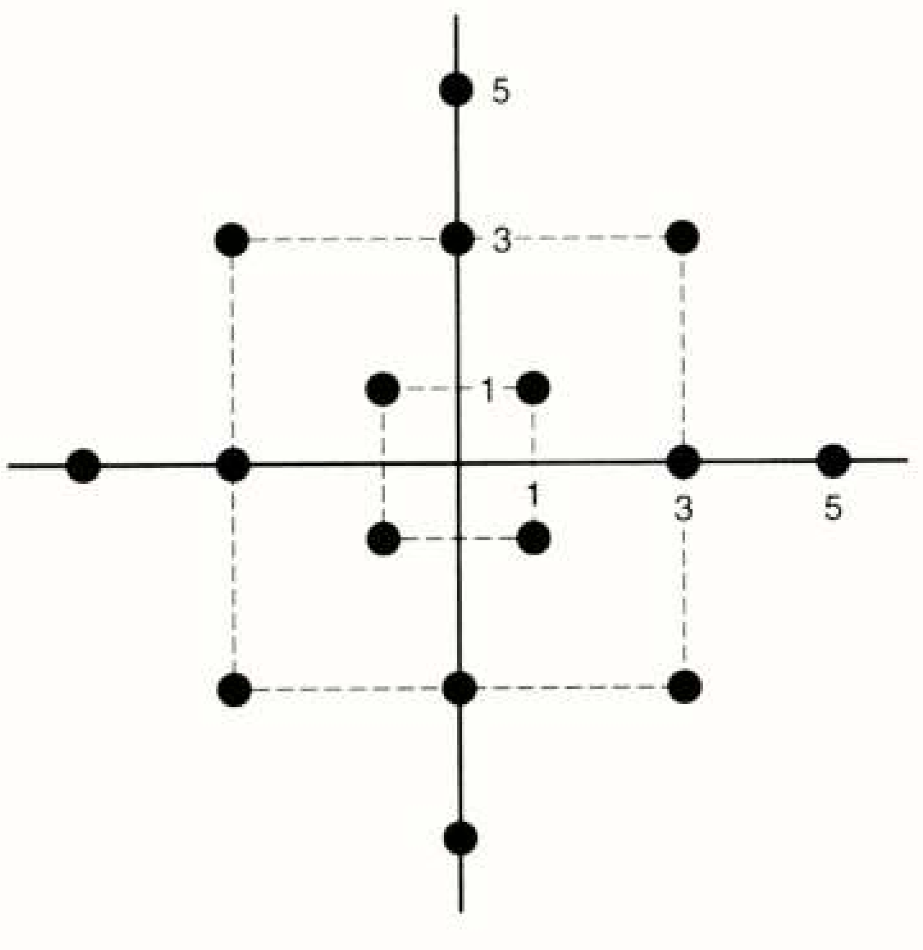
Voor de lage bitsnelheden (V21 en V23) is FSK ("frequency shift keying") de aangewezen modulatiemethode. Hierbij schakelen de nullen en enen van de digitale informatiestroom de draaggolffrequentie van de modem tussen twee discrete waarden. FSK is eenvoudig te implementeren, robuust en goed bestand tegen de imperfecties van het telefoonkanaal. FSK is echter niet bijzonder efficiënt in bandbreedtegebruik.

Vanaf bitsnelheden van 2400 bit gaat men daarom over op complexere modulatiemethodes. Zo werken modems volgens de V26-aanbeveling met 4PSK ("phase shift keying"), waarbij de fase van de draaggolf 4 faseposities kan innemen afhankelijk van combinaties van steeds 2 opeenvolgende informatiebits. Vaak past men DPSK ("Differential Phase Shift Keying") toe. Hierbij bepalen de "dibits" niet de absolute librarypositie van de draaggolf, maar een fasesprong. Aan de ontvangstzijde wordt het signaal eerst geëgaliseerd om de amplitude- en fasevervorming van het transmissiekanaal te compenseren en vervolgens gedemoduleerd, waarna met een uit het signaal teruggewonnen klok de digitale symbolen uit de fasesprongen worden gereconstrueerd. De bandbreedte-efficiëntie van deze modulatiemethode is (theoretisch) 2 bits/Hz. Het signaalspectrum is zo'n 1200 Hz (in de praktijk 1400-1500 Hz) breed en past dus royaal in de 3000 Hz bandbreedte van het telefoonkanaal in geval van een "half-duplex"-verbinding. Om een "volledig

duplex"-verbinding te creëren kunnen de heen- en retourband in frequentiestapeling binnen het telefoonkanaal worden geplaats. Hierbij zijn er verschillen tussen huurlijnen en verbindingen in het geschakelde net (PSTN). Huurlijnen worden in de schakelcentra van het netwerk buiten de schakeltrappen omgeleid en hebben derhalve een gegarandeerde, minimum transmissiekwaliteit, beter dan die van PSTN-verbindingen.

Modems voor 4800 bits/s (V27) gebruiken 8PSK als modulatiemethode. Groepjes van 3 opeenvolgende bits van de informatiestroom schakelen de fase van de draaggolf tussen 8 mogelijke posities. De bandbreedte-efficiëntie van 8PSK is theoretisch 3 bits/Hz, zodat het signaalspectrum 1600 Hz (in de praktijk ongeveer 1800 Hz) breed is. Hierdoor is het onmogelijk om de heen- en retourkanalen van een volledig duplex dataverbinding in frequentie te stapelen binnen de beschikbare 3000 Hz van het telefoonkanaal. Voor "volledig duplex"-dataverkeer moet men zijn toevlucht nemen tot ofwel een vierdraadsverbinding, of dient de modem te worden uitgerust met een echo-onderdrukker [4]. Verbindingen in het geschakelde (telefoon)net zijn tweedraads zodat hier de modem met echo-onderdrukker (V27*ter*) noodzakelijk is.

Voeren we de bitsnelheid nog verder op (9600 bits/s) dan moeten we onze toevlucht zoeken tot nog complexere modulatiemethodes zoals combinaties van fase- en amplitudemodulatie om het signaalspectrum binnen de beschikbare bandbreedte van het telefoonkanaal te houden. In de 4AM/4PSK-methode schakelen groepjes van 4 opeenvolgende bits van de informatiestroom de draaggolfvector tussen 16 mogelijke toestanden (4 faseposities plus 4 amplitudewaarden; zie figuur 3). Met een bandbreedte-efficiëntie van 4 bits/



Figuur 3: Het "signal-space"-diagram van het uitgangssignaal van V29- en V32-modems. De draaggolfvector springt met de Baudfrequentie tussen 16 mogelijke toestanden.

Hz is tenminste 2400 Hz (in de praktijk 2600-2800 Hz) bandbreedte nodig voor de overdracht van het 9600 bits/s datasignaal. V32*bis* modems voor 14,4 kbit/s hebben nog meer bandbreedte nodig.

De ultieme bitsnelheid wordt gegeven door de "Shannon bound". Deze geeft de theoretische limiet voor de bitsnelheid als functie van de signaal/ruisverhouding op het kanaal en de kanaalbandbreedte. Bij benadering is de "Shannon bound" gelijk aan:

$$Rsh = (SNR \cdot B)/3$$

Hierin is Rsh de maximum bitsnelheid in kbit/s, SNR de signaal/ruisverhouding op het kanaal in dB en B de bandbreedte van het kanaal in kHz. Bij praktische signaal/ruisverhoudingen van 20-30 dB ligt de theoretische ("Shannon") kanaalcapaciteit van het telefoonkanaal met een bandbreedte van zo'n 3kHz dus rond de 20-30 kbit/s. Moderne datamodems komen vrij dicht bij deze theoretische grens dank zij verfijnde digitale signaalbewerkingsmethodes, automatische egalisatoren enzovoort. Met de voortschrijdende verbeteringen in de transmissiekwaliteit van dit soort kanalen schuift de maximaal haalbare bitsnelheid verder op.
Gezien het brede signaalspectrum en de toenemende gevoeligheid voor ruis en looptijdvervorming van het kanaal is in modems voor hoge bitsnelheden egalisatie onontbeerlijk. Het zal duidelijk zijn dat "volledig duplex"-dataverkeer vierdraadsverbindingen vereist of, op tweedraadsverbindingen, een modem met echo-onderdrukker. Egalisatoren en echo-onderdrukkers in modems voor de hogere bitsnelheden worden zonder uitzondering als adaptieve, digitale signaalprocessoren uitgevoerd. Ook de meeste andere modemfuncties, zoals filtering, modulatie, demodulatie, draaggolf- en klokterugwinning, worden tegenwoordig digitaal geïmplementeerd. Alleen de fysieke lijninterface (lijntrafo enzovoort) zijn nog als analoge componenten herkenbaar.

De bloeitijd van de V-modems lag in de jaren zeventig en tachtig. Bedrijven gebruikten steeds krachtiger modems om aan hun groeiende communicatiebehoeften te voldoen. Modems zijn nog steeds een belangrijk element in de datacommunicatie. De introductie van gespecialiseerde datacommunicatienetten als DN1 in Nederland, luidde echter een verschuiving in het gebruik in. Inmiddels zijn veel (grotere) bedrijven voor hun externe dataverkeer overgeschakeld op speciale digitale datanetten. Had een "beetje kantoor" in het begin van de jaren tachtig genoeg aan een 4800bit/s-modem, nu is 64 kbit/s wel het minimum en 2 Mbit/s geen uitzondering. Niet iedereen heeft echter de beschikking over een rechtstreekse toegang tot een datanet of over een ISDN-aansluiting. Veel kleinere bedrijven en inmiddels ook veel privégebruikers passen nog steeds V-modems toe. De verbetering in kwaliteit van zowel het telefoonnetwerk als de modems (onder meer door toepassing van automatische egalisatoren) betekent dat V-modem-gebruikers probleemloos hoge bitsnelheden (4800-14400 bits/s) kunnen versturen, iets dat in de jaren zestig en zeventig alleen aan de "kapitaalkrachtigen" was voorbehouden. Was de vuistregel voor de prijs van een modem in die tijd "een dollar per bit", tegenwoordig koopt men voor een fractie van dit bedrag een modem met aanzienlijk betere prestaties. Moderne modems beschikken tevens over een automatische"fall-back" faciliteit. Is de kwaliteit van de verbinding onvoldoende, dan schakelt de modem automatisch terug naar een lagere bitsnelheid die wel past bij de transmissiekwaliteit van het kanaal.

Compressie

Moderne vormen van datacommunicatie vragen steeds hogere datasnelheden, kortere reactietijden bij interactief verkeer en een steeds betere benutting van de beschikbare transmissiekanalen. Hogere bitsnelheden kunnen in theorie met nog verfijndere modulatiemethodes in de beschikbare bandbreedte worden gepakt. De betrouwbaarheid van dergelijke systemen in het telefonienetwerk is echter twijfelachtig te meer daar de kwaliteit van de verbinding aan fluctuaties onderhevig is. Beter is gebruik te maken van zogenoemde compressiemethodes zoals vastgelegd in CCITT-aanbeveling V42*bis*. De synchrone datacompressietechniek maakt gebruik van het ZIV-LEMPEL algoritme: een "lossless" compressiealgoritme dat reeksen karakters codeert en de volledige data-integriteit handhaaft tijdens comprimeren en expanderen. Het begrip "lossless" betekent dat geen informatie tijdens het compressieproces verloren gaat, zodat altijd een volledige reconstructie van het over te dragen

digitale signaal mogelijk blijft.
De werking van het algoritme laat zich in het kort als volgt beschrijven. Reeksen opeenvolgende karakters worden in een "vertaaltabel" opgeslagen en als een index gecodeerd. In plaats van de reeksen bits zelf worden de tabel-indexen overgedragen. In de ontvanger volgt het omgekeerde proces. In geavanceerde implementaties van dit compressieschema worden de vertaaltabellen adaptief aangepast aan het karakter van de informatie. In feite hebben we dan te maken met een lerend systeem [7]. Afhankelijk van het soort data kan in de praktijk een compressiewinst van een faktor 4 worden bereikt, wat een effectieve datasnelheid van ruim 38 kbit/s over een telefoonlijn oplevert. Vanzelfsprekend is de compressiefaktor afhankelijk van het soort informatie dat moet worden verzonden. Tekstfiles comprimeren over het algemeen heel goed, terwijl aan binaire files geen eer te behalen is.
Compressietechnieken zijn gemeengoed aan het worden dus niet alleen in modems voor het telefoonnet. Ook in de data-opslagomgeving wordt dit soort algoritmes toegepast onder andere voor het virtueel vergroten van de opslagcapaciteit van hard disks.

Datanetwerken

In de afgelopen jaren zijn de computernetwerken binnen bedrijven geëvolueerd van terminalnetwerken, die "domme" eindstations koppelden met de centrale computer, naar "local area netwerken". In eerste instantie werden deze LAN's op dezelfde manier gebruikt als de vroegere terminalnetwerken. De tegenwoordige trend is echter die van een "client-server"-architectuur. Applicatie-pakketten, afkomstig van een server, draaien op individuele werkstations, die voor hun gegevensopslag vaak weer afhankelijk zijn van diskruimte op de servers. Deze nieuwe architectuur betekent een voortdurend "swoppen" van informatie tussen servers en eindstations en dus een aanzienlijke toename van het onderlinge verkeer. Een eenvoudig voorbeeld is tekstverwerking op PC's waar betrekkelijk primitieve, maar efficiënte tekstverwerkers verdrongen zijn door "Wordperfect" of "Words for Windows" op de netwerkserver. Een beetje tekstbestand dat vroeger enkele tientallen kilobytes groot was, vraagt tegenwoordig al gauw enkele honderden kilobytes. Voegt men er nog wat plaatjes aan toe dan is een "tekstbestand" van enkele megabytes geen uitzondering. Alhoewel een belangrijk deel van de informatie-uitwisseling op de LAN's blijft, neemt ook de hoeveelheid verkeer over publieke netwerken aanzienlijk toe, omdat de LAN-eilanden onderling gekoppeld worden.

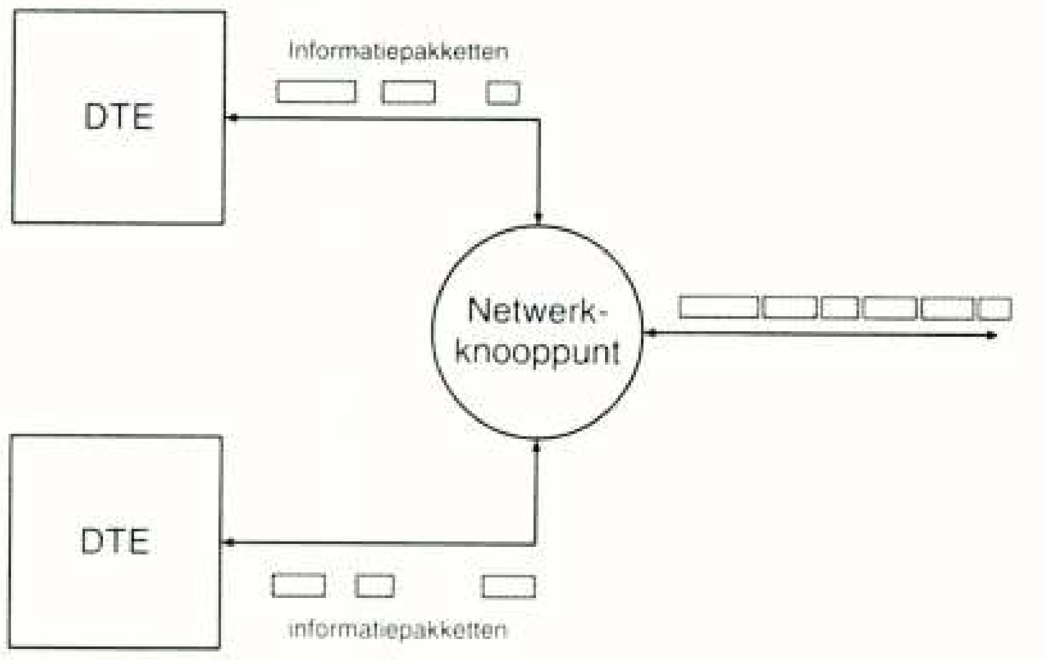
Behalve een explosieve groei in de hoeveelheid verkeer zien we ook een verandering in het karakter van het dataverkeer. Aanzienlijke databestanden worden op onregelmatige tijdstippen uitgewisseld. Het dataverkeer krijgt een meer "bursty" karakter met grote verschillen tussen de piekbelasting en de gemiddelde vraag naar transmissiecapaciteit. Voor dit "bursty" dataverkeer is het telefoonnet met zijn V-modems minder geschikt. Dit net werkt volgens het circuitschakelende principe: er wordt een verbinding met een bepaalde (maximum) capaciteit tussen twee eindstations opgebouwd aan het begin van de sessie en deze verbinding blijft "staan" voor de duur van de sessie. Gezien het feit dat de verbindingsopbouw enige tijd in beslag neemt, dienen sessies om efficiëntie-redenen niet te kort te zijn. Voor een telefoongesprek is de verbindingsopbouwtijd geen probleem; de gemiddelde gespreksduur is immers 100 s. Ook voor de vroegere vormen van dataverkeer gaf dit geen probleem; daarbij ging het meestal om het oversturen van aanzienlijkedatabestanden. "Bursty" datacommunicatie en een circuitgeschakeld telefoonnetwerk gaan niet goed samen. Ook leidt de beperkte transmissiecapaciteit van het telefoonnet tot lange wachttijden als het gebruikt wordt voor typische LAN-LAN communicatie.
Tabel 3 illustreert dit aan de hand van vuistgetallen voor de responsetijd van verschillende applicaties bij een drietal transmissiesnelheden. Deze snelheden komen "grosso modo" respectievelijk overeen met de maximale bitsnelheid in het geschakelde telefoonnet, een X.25-datanet en een modern "frame relay"-netwerk. Het zal duidelijk zijn dat de 20-30 kbit/s, die met compressie via het geschakelde telefoonnet haalbaar is, problematisch wordt als de applicatie interactief wordt gebruikt.

Transporttijd van veel voorkomende applicaties

Type file	*20 kbit/s*	*64 kbit/s*	*2 Mbit/s*
Tekst (1 pagina)	1 s	1/3 s	1/100 s
Spreadsheet (1 pag.)	18 s	6 s	1/5 s
Grafische pagina	45 s	15 s	1/2 s
Programma file	3 min	1 min	2 s

Tabel 3

Pakketschakelende netwerken handelen "bursty" dataverkeer veel efficiënter af dan het circuitgeschakelde telefonienetwerk. Kenmerkend voor deze netwerken is het gebruik van communicatieprotocollen die het mogelijk maken informatiepakketten van een groot aantal gebruikers in de tijd te stapelen



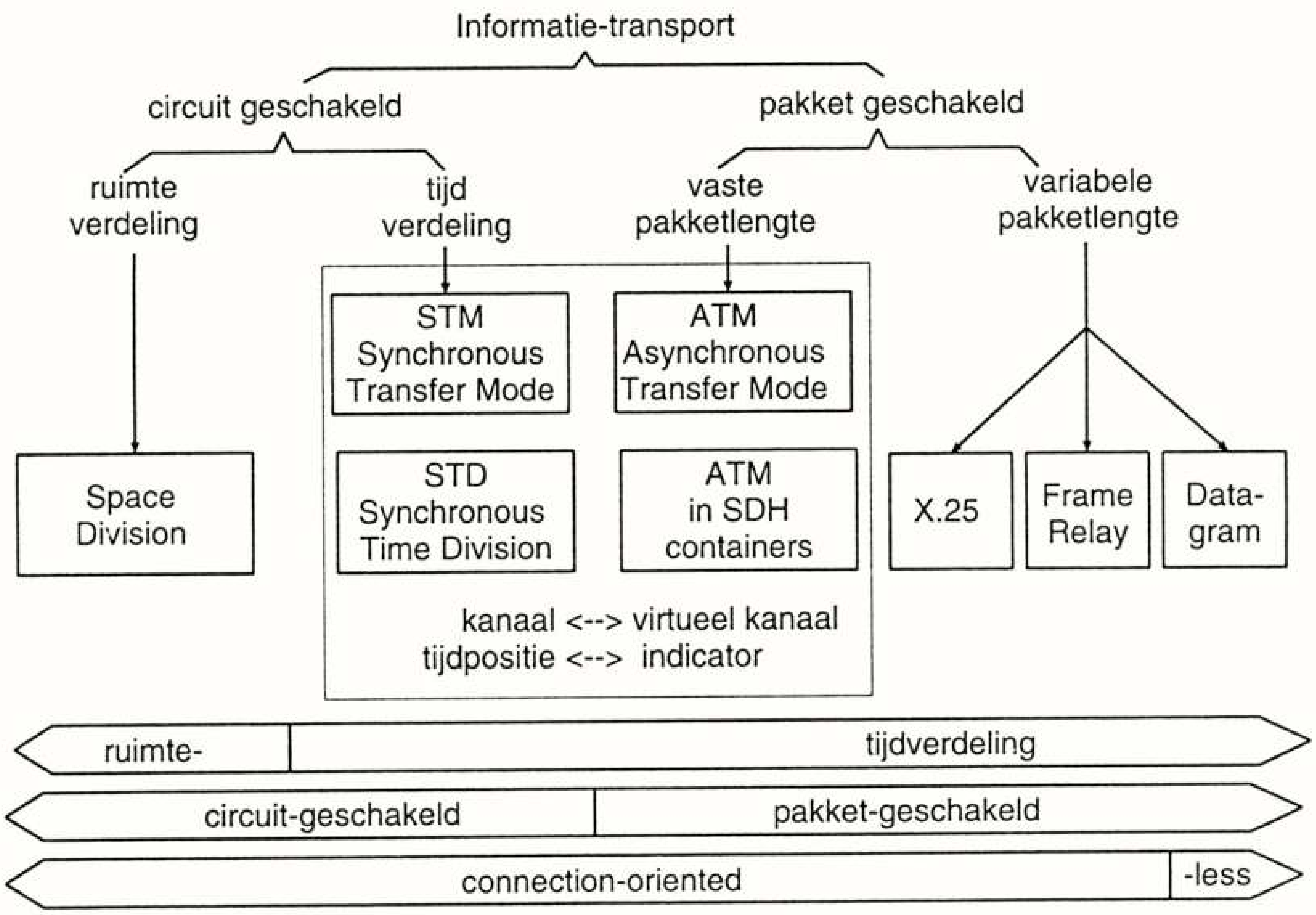
Figuur 4: Pakketschakelende netwerken stapelen efficiënt datapakketten van verschillende DTE's op één fysiek communicatiemedium.

("interleaven") en over één communicatielijn te sturen (figuur 4). De fysieke verbinding biedt daarbij plaats aan een (groot) aantal *virtuele* verbindingen voor de verschillende gebruikers.

X.25-protocol

X.25 is een voorbeeld van een dergelijk communicatieprotocol. Vandaag de dag hebben X.25-datanetwerken een wereldwijde dekking. Krachtige eindstations, die in staat zijn zelf het (complexe) X.25-protocol af te handelen, hebben rechtstreeks toegang tot het netwerk. Daarnaast bieden X.25-netwerken meestal de mogelijkheid ook eenvoudige (domme) eindstations aan te sluiten via een zogenoemde PAD ("Packet Assembler and Disassembler"), waarop verschillende eindstations worden aangesloten bijvoorbeeld via RS.232 interfaces. De PAD verzorgt de conversie van RS.232 naar X.25 en visa versa.

Binnen X.25 zijn twee typen verbindingen gedefinieerd namelijk *permanente virtuele verbindingen* (PVC) en *virtuele verbindingen* (VC). Een PVC wordt vooraf gedefineerd door de netwerkbeheerder. Het opzetten van een VC doet



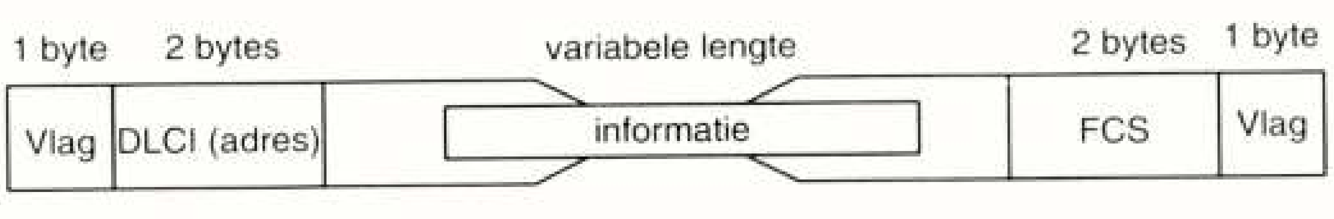
Figuur 5: Overzicht van de verschillende manieren van informatietransport in communicatienetwerken. De onderverdeling is in circuit- en pakketschakelen. Circuitschakelen kan in ruimte- en tijd; pakketschakelen met vaste of variabele pakketlengte. Verder onderscheidt men nog "connection-oriented" en "connection-less" als er wel of geen (virtuele) verbinding wordt opgebouwd (naar Krick, referentie [9])

de gebruiker zelf door het aangeven van een bestemmingsadres ("Network Terminal Number") dat uniek is voor ieder X.25-apparaat. Dit resulteert in het vastleggen van een netwerkpad tussen 2 DTE's totdat de zender, of de ontvanger, dit pad expliciet weer vrijgeeft. We noemen dit een *"connection oriented"* manier van communiceren in tegenstelling tot *"connection less"* waar ieder pakket opnieuw een weg door het netwerk moet zoeken (voorbeeld: datagram-verkeer in Ethernet). Figuur 5 geeft een overzicht van de verschillende klassen van informatietransport[2].

Het X.25-protocol berust op het "store and forward" principe. Datapakketten die het netwerk binnenkomen, worden in een netwerkknooppunt gebufferd en in volgorde van aankomst over de fysieke link naar het volgende knooppunt gestuurd. Een X.25-netwerk beheert het foutloze transport per link tussen twee knooppunten. Wordt een fout gedetecteerd dan leidt dit tot een verzoek om retransmissie van het verminkte pakket. Een X.25-netwerk staat dus garant voor een foutloos transport van de informatiepakketten tussen de aangesloten DTE's. Wel kan het onder ongunstige transmissiecondities enige tijd duren om een pakket correct over te krijgen. X.25 is daarmee een voorbeeld van een "zwaar" communicatieprotocol, daterend uit een tijd toen de kwaliteit van de communicatiemedia nog te wensen overliet en de transportdienst dit euvel diende te maskeren. Het afhandelen van het protocol kost namelijk een aanzienlijke hoeveelheid *"processing power"* en vertraging in het pakkettransport. Gevolg is dat X.25-netwerken over het algemeen geen snellere transmissiesnelheden dan 64-128 kbit/s (kunnen) ondersteunen. Voor LAN-LAN-interconnectie is X.25 gezien de "overhead" en het betrekkelijk geringe netwerkdebiet dus minder geschikt.

Frame Relay protocol

Een moderne variant van X.25 is *Frame Relay (FR)* [8]. Dit protocol[3] is toegesneden op de speciale snelheids-eisen van LAN-LAN-interconnectie via publieke datanetwerken. Net als X.25 gebruikt Frame Relay een identificatiecode in de preambule van ieder frame (pakket) die de netwerkknooppunten in staat stelt het pakket naar de juiste bestemming te routeren via permanente virtuele verbindingen. Weer kan een DTE door elkaar frames met verschillende identificatiecodes genereren en dus parallele sessies met verschil-



Figuur 6: Opbouw van een "Frame Relay"-frame met begin- en eindvlaggen, adresveld, variabele lengte informatieveld en een "frame check sum" veld

lende bestemmingen via één fysieke communicatielink onderhouden. Dit is vooral van belang als de DTE een communicatiepoort van een LAN is. Een FR-frame (figuur 6) bestaat uit een "flag" van 1 byte, gevolgd door een adresveld van 2 bytes. Daarna volgt de informatie. De lengte van het informatieveld is (binnen een maximum) variabel. Meestal kiest men de lengte zodanig dat er een volledig informatiepakket van de betreffende applicatie in past, bijvoorbeeld een TCP/IP-pakket, een X.25-pakket en dergelijke. Het FR-frame eindigt met een FCS ("Field Check Sum") voor foutendetectie (2

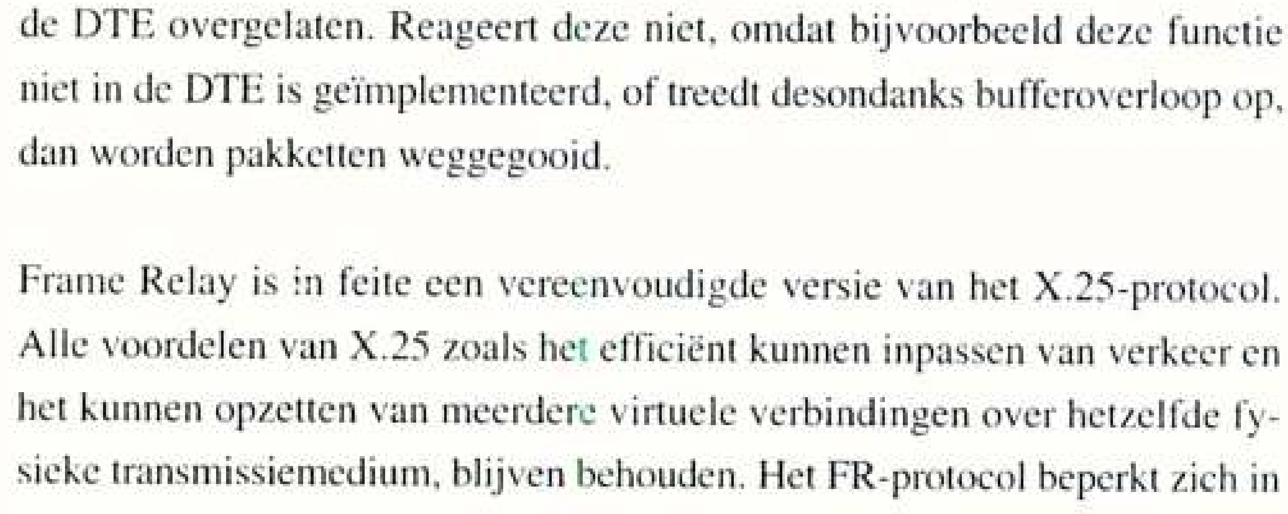
bytes) en een "flag"-byte om het eind van het frame aan te geven.
Frame Relay verschilt van X.25 in de foutencorrectiemechanismes en in de manier waarop congestie in het netwerk wordt afgehandeld. In tegenstelling tot X.25, waar een foutieve FCS een retransmissieprocedure initieert, worden foutieve frames in een "Frame Relay"-netwerk simpelweg uit de pakketstroom verwijderd. Dit klinkt erger dan het is, omdat (afhankelijk van de applicatie) het zorgen voor een foutvrij transport van informatiepakketten op applicatieniveau vaak al onderdeel is van het applicatieprotocol. Wel is - ingeval een pakket verminkt aankomt wat door het "hogere laags"-protocol wordt gedetecteerd - een retransmissie over de totale verbinding van DTE naar DTE nodig in plaats van over een deel van de verbinding tussen twee netwerkknooppunten zoals bij X.25. Dit kost vanzelfsprekend meer tijd.
Desondanks wint ruwweg gesproken Frame Relay het in efficiëntie van X.25 als de bitfoutenkans op de individuele links van het netwerk kleiner is dan 10^{-6}. Zoals eerder is opgemerkt bieden moderne communicatienetwerken een transportdienst ("carrier service") van een zeer hoge kwaliteit. Bitfoutenkansen van 10^{-10} of beter zijn geen uitzonderingen.

Ook in de manier van congestie-afhandeling verschilt Frame Relay van X.25. In een X.25-netwerk zendt het netwerkknooppunt "acknowledge"-boodschappen naar de DTE als ontvangstbevestiging op de pakketten die de DTE het netwerk instuurt. Dit mechanisme regelt het verkeersaanbod. Wordt geen ACK-boodschap ontvangen dan staakt de DTE het zenden van pakketten. Het resultaat is een stabiel en "gemanaged" systeem waar de verkeersbelasting door het netwerk wordt geregeld ten koste van extra vertraging. Frame Relay volgt echter een afwijkend principe. In plaats van ieder pakket te bevestigen, stuurt het netwerkknooppunt alleen een boodschap naar de DTE als congestie dreigt. Het nemen van actie (minder pakketten sturen) wordt echter aan de DTE overgelaten. Reageert deze niet, omdat bijvoorbeeld deze functie niet in de DTE is geïmplementeerd, of treedt desondanks bufferoverloop op, dan worden pakketten weggegooid.

Frame Relay is in feite een vereenvoudigde versie van het X.25-protocol. Alle voordelen van X.25 zoals het efficiënt kunnen inpassen van verkeer en het kunnen opzetten van meerdere virtuele verbindingen over hetzelfde fysieke transmissiemedium, blijven behouden. Het FR-protocol beperkt zich in feite tot routering van de informatiepakketten en laat foutenbescherming en congestiemanagement aan de DTE's over. Het gevolg is een sterke vermindering van de "processing-overhead" en dus een potentieel groter debiet van het netwerk. Frame Relay ondersteunt 2Mbit/s-transmissie, maar ook aanzienlijk hogere bitsnelheden zijn mogelijk.

ATM protocol

Als laatste in de serie "lichte" datacommunicatieprotocollen willen we ATM (*"Asynchronous Transfer Mode"*) noemen. ATM is een verdere vereenvoudiging van het "Frame Relay"-principe [9]. De "variabele lengte"-frames van Frame Relay zijn bij ATM vervangen door frames (cellen genoemd) van een



Figuur 7: Opbouw van een ATM-frame (cel). De cel bestaat uit een "header" van 5 bytes en een "payload" van 48 bytes. De header bevat netwerkspecifieke informatie.

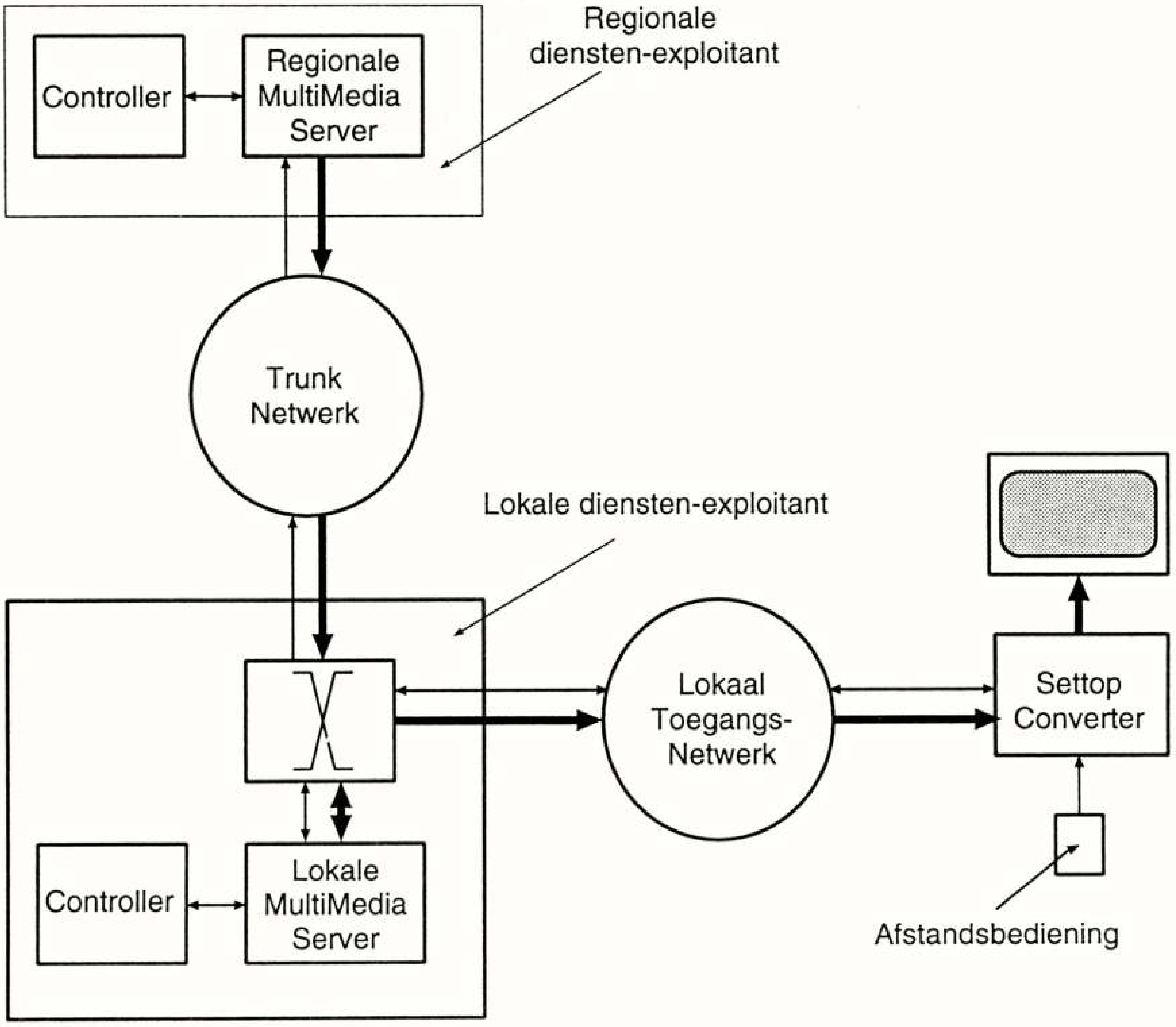
vaste lengte van 53 bytes. Iedere cel bestaat uit een "header" van 5 bytes voor netwerkinformatie en een "payload" van 48 bytes (figuur 7). De header bevat een *"virtual channel identifier" (VCI)* plus *"virtual path identifier" (VPI)* voor adressering, en additionele informatievelden waaronder een *"quality of service"* indicator (QSI), een *"payload type"* indicator (PTI) en een *"header error control"* (HEC). Voor een preciese beschrijving van de functies van deze velden raadplege men referentie [9]. Het HEC-veld ondersteunt een foutdetectie- en foutcorrectie-algoritme dat 2 fouten in de celheader kan detecteren en één fout kan corrigeren. Dit is van belang, omdat fouten in de VCI en VPI tot gevolg hebben dat de gecorrumpeerde cel aan een verkeerde DTE wordt afgeleverd. Doordat de cellengte vast is, zijn geen extra bytes nodig om het einde van de cel aan te geven.

ATM hoort tot de klasse van "connection oriented" communicatieprotocollen. Cellen worden in het netwerk getransporteerd via virtuele verbindingen; een begrip dat we ook bij Frame Relay al hebben gezien. Alle netwerkknooppunten leggen voor de virtuele verbindingen in hun routeringtabellen het verband tussen de VCI/VPI in de celheader(s) van een DTE-sessie en de uitgaande link vast. Arriveert een ATM-cel dan leest het knooppunt de VCI/VPI in de celheader en routeert de cel naar de volgende netwerkknoop. Netwerkknooppunten overschrijven de oude VCI met een nieuwe, die voor het volgende knooppunt relevant is. Dit mechanisme maakt het mogelijk de grootte van het VCI veld te beperken zonder aan routeringsfunctionaliteit in te boeten.

Net als Frame Relay minimaliseert ATM de "processing overhead" door geen retransmissiemechanisme te ondersteunen noch congestiemanagement te implementeren. Ook bij ATM kunnen cellen verloren raken en moet - als de applicatie daaraan behoefte heeft - bescherming tegen het verlies van cellen of bitfouten in cellen in de applicatie worden geregeld. Het resultaat is wederom een zeer efficiënt datatransfer-protocol dat hoge bitsnelheden op de transportmedia ondersteunt. Op dit moment wordt ATM toegepast in LAN-applicaties bij bitsnelheden van 155 Mbit/s. Ook in het publieke net worden op dit moment in Europees verband proeven gedaan met een publiek 155Mbit/s-ATM-netwerk. Hogere snelheden zijn evenwel haalbaar. ATM kan getransporteerd worden in de payload-containers van SDH voor transport over grote afstanden in geconcentreerde verkeersbundels. Eerder is al opgemerkt dat ATM door CCITT (aanbeveling I.121) gebombardeerd is tot *het* communicatieprotocol voor het breedband ISDN, zodat ook voor onze toekomstige multimedia-toepassingen we ATM als multiplexlaag moeten zien.

Multimedia en de informatiesnelweg

Tot nu toe hebben we gekeken naar traditionele datacommunicatie via het telefoonnetwerk en naar specifieke datacommunicatie-eisen die door LAN-LAN-interconnectie worden gegenereerd. Naast deze professionele toepassingen van datacommunicatie wordt tegenwoordig veel energie gestoken in het "promoten" van het concept van de *informatiesnelweg*. De informatiesnelweg is in eerste instantie een "service-concept" en pas in tweede instantie een "netwerkconcept". De informatiesnelweg is synoniem met het utopische beeld dat iedere televisie en iedere PC in de toekomst via digitale netwerken toegang heeft tot een onuitputtelijk reservoir interactieve multimedia-diensten, zowel voor professionele als residentiële gebruikers.
Op dit beeld valt vanuit een economische invalshoek nog wel wat af te dingen, maar zeker is dat er een aantal "genetwerkte" applicaties zal ontstaan. Voorbeelden in de professionele hoek die wellicht levensvatbaar zijn, zijn: videovergaderen, telewerken, het raadplegen van informatiebanken, multimediapost, allerlei vormen van "electronic publishing", gerichte training enzovoort. Een kleine greep uit de meer of minder futuristische residentiële toe-

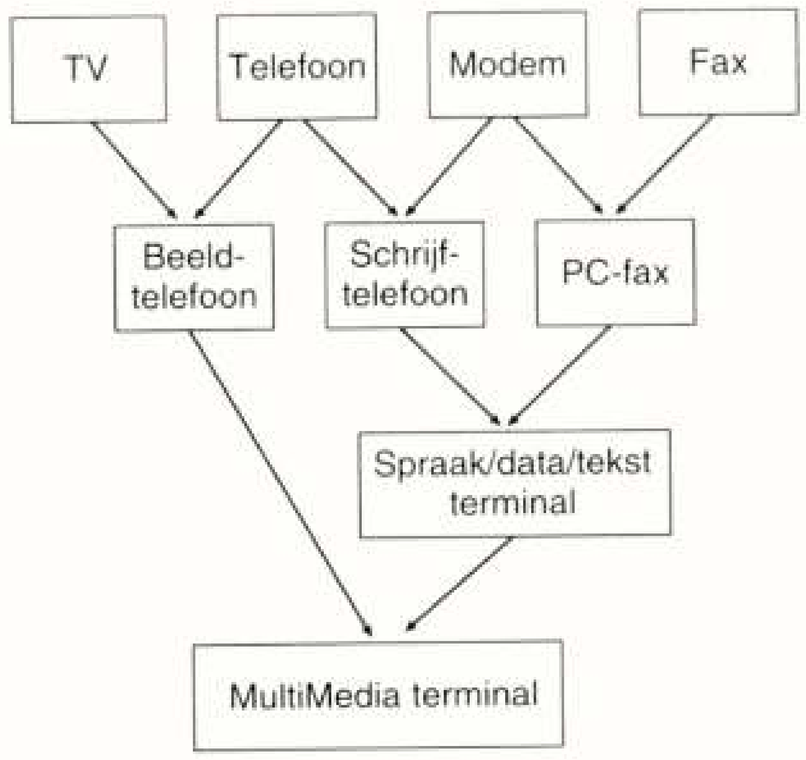


Figuur 8: Hiërarchische opbouw van een residentiële multimedia-dienst. De dikke pijlen geven de MM-stromen aan; de dunne pijlen de besturingscommando's.

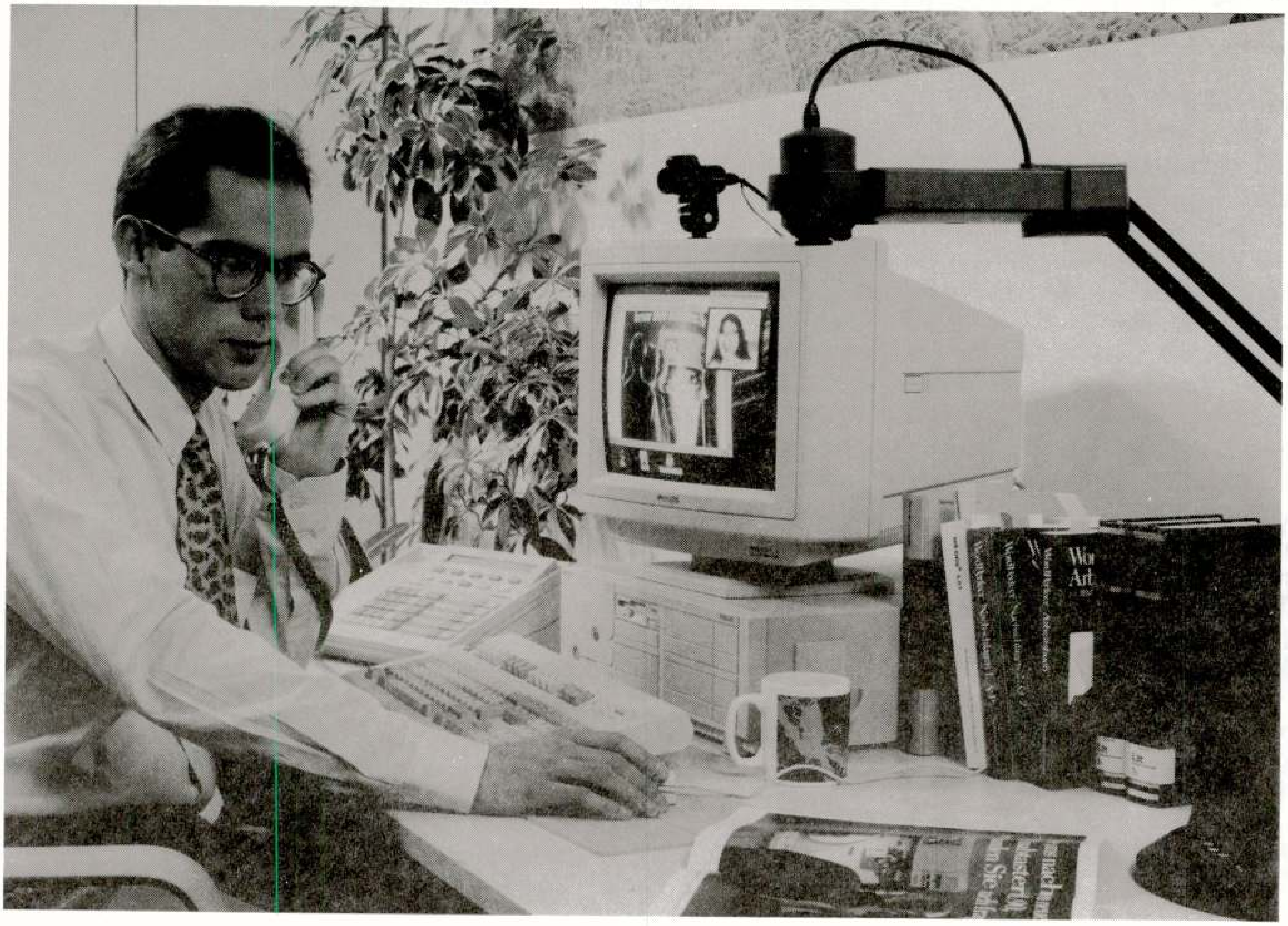


Een van de nieuwe digitale diensten, waarvan veel wordt verwacht, is thuisbankieren. (foto Postbank)

passingen zijn: "video-on-demand", thuiswinkelen, thuisbankieren, spelletjes met meerdere personen, loterijen enzovoort. Deze diensten zullen dan geleverd worden door zogenoemde *"servers"* , waarvan sommige dicht bij de abonnees (lokaal) staan opgesteld en andere via het "lange afstands"- of trunknetwerk bereikbaar zijn (figuur 8). Het concept van lokale servers is essentieel voor de economie van bepaalde diensten zoals video-on-demand. De prijs die mensen bereid zijn hiervoor te betalen, is gefixeerd door de prijsstelling van het alternatief: de videotheek. Communicatiekosten (dus afstanden) dienen daarom tot een minimum te worden beperkt.



Figuur 9: Monolithische diensten (TV, telefoon, data en stilstaand beeld) integreert via een aantal tussenfasen naar multimedia diensten.



Voorbeeld van een multimedia-PC voor aansluiting op de 64kbit/s-verbindingen van het ISDN-net. (foto Philips)

Ontdoen we het fenomeen "informatiesnelweg" van de glitter en glamour die er door de politiek en sommige media aan wordt toegeschreven dan blijft er - kijkend naar de datacommunicatie-aspecten - gewoon het al eerder genoemde breedband ISDN over. Hierin zullen de "monolithische" telecommunicatiediensten spraak, data, tekst en beeld samenvloeien in nieuwe toekomstgerichte diensten. Gebruikers-eindstations (terminals) evolueren naar multimedia-terminals. Deze evolutie zal in een aantal stappen gebeuren (figuur 9), waarin een beperkt aantal functies in een nieuw terminalconcept wordt gecombineerd. Sommige van de 'tussenfasen" kennen we nu al. Spraak en beeld integreren eerst tot de beeldtelefoon, waaraan later weer snufjes uit de datacommunicatie (bijvoorbeeld een gemeenschappelijk werktablet) worden toegevoegd.

Sommige van de technische parameters, zoals het communicatieprotocol (ATM), liggen via CCITT I.121 al vast. ATM is bij uitstek geschikt voor het datatransport van multimediadiensten. De voordelen voor multimedia toepassingen zijn:

- ATM is een efficiënte methode voor het leveren van "bandbreedte op aanvraag". Hierdoor wordt de netwerkcapaciteit optimaal benut.
- ATM biedt de mogelijkheid zelfs binnen een sessie de bandbreedte te variëren. Bij veel multimedia-applicaties varieert de bitsnelheid binnen wijde grenzen bijvoorbeeld tussen 0 en 6 Mbit/s.
- ATM ondersteunt naar wens ook kanalen met een constante bitsnelheid (bijvoorbeeld spraak).
- ATM is flexibel en gemakkelijk aan te passen.
- ATM is een algemeen geaccepteerde standaard waardoor het mogelijk is één en hetzelfde protocol door het hele netwerk te gebruiken vanaf de LAN's tot en met de trunks en vanaf de servers tot aan de multimedia terminals in de huiskamer.Dezelfde algemene acceptatie zorgt voor grote produktievolumes (lage prijzen) van ATM-componenten.

Ligt het communicatieprotocol voor de informatiesnelweg hiermee vast, andere systeemparameters als netwerktopologie, dienstenpakket enzovoort zijn nog "voer voor futurologen". Op puur economische redenen lijkt het echter voor de hand te liggen dat bestaande netwerken, met name telefonienetwerken en ook kabeltelevisie-netwerken (CATV), een onderdeel van de informatiesnelweg zullen gaan uitmaken.

Om allerlei redenen, zoals het streven naar verlaging van onderhoudskosten, uitbreiding van capaciteit, introductie van nieuwe diensten en concurrentie-overwegingen, maken beide netwerktypes een proces van verbetering en modernisering door. Zowel telefoonmaatschappijen als CATV-netwerkexploitanten introduceren op grote schaal glasvezeltechnologie in hun lokale toegangsnetwerken. Vanuit technisch perspectief bekeken migreren beide netwerkvormen naar functioneel vrijwel identieke netwerken. Verder maakt de wetgever door de liberalisering van de telecommunicatiemarkt het aan de verschillende spelers op het communicatiespeelveld mogelijk hun traditionele dienstenpakket uit te breiden. Zo kunnen exploitanten van CATV-netwerken nu of in de nabije toekomst telefonie- en datadiensten via hun netwerk aanbieden en PTT's op hun beurt videodiensten, zodat ook op het exploitatieniveau en qua dienstenpakket beide netwerken steeds meer op elkaar gaan lijken. Onderlinge koppeling zal er in de toekomst voor moeten zorgen dat een volledige connectiviteit gewaarborgd is. Het resultaat is een systeem van onderling gekoppelde netwerken en servers ofwel de veel bezongen informatiesnelweg.

Referenties

[1] Ir A.P. Verlijsdonk; Digitale modulatie- en filtertechnieken bij synchrone datatransmissie; Elektronica en Telecommunicatie 2, 27 februari 1970.

[2] Ir P. van der Wurf; Eigenschappen van synchrone digitale signalen toegepast in een volledig geïntegreerde datazender; Elektronica en Telecommunicatie 4, 1 mei 1970.

[3] W.A.M. Snijders; Microprocessor Implementatie van datamodems; Tijdschrift van het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap deel 42, nummer 4, 1977.

[4] Ir. H.C. van den Elzen; Echocancelling in tweedraads full-duplex transmissie met bipolaire codering; Tijdschrift van het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap deel 42, nummer 4, 1977.

[5] Paul E. Green; An introduction to network architectures and protocols; IEEE transactions on communications, Vol Com-28, nummer 4, april 1980.

[6] Ir T. Schaap, Ir P.K. Tilburgs en Ir. C.J. Vermij; Datacommunication within the Rabobank; Tijdschrift van het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap; deel 52, nummer 2, 1987.

[7] Therry Sens; Synchrone datacompressie in V32- en V32-bis modems; DA Technologie, jaargang 3, nummer 6, juni 1993.

[8] Kajsa Lundfall; Frame Relay for faster and more efficient data communications; Ericsson Review No. 1-2, 1992.

[9] Wolfgang Krick; Asynchronous Transfer Mode: Universeel concept voor informatietransport in communicatienetwerken; DA Technologie, jaargang 1, no. 12, pag. 44-52, 1991.

[1] We gebruiken in dit artikel de van oorsprong engelse, maar allom ingeburgerde term *interface* in plaats van het nederlandse *koppelvlak* dat in vroeger jaren door taalpuriteinen werd gebezigd.

[2] ATM ondersteunt zowel connection-oriented als connection-less verkeer

[3] Frame Relay dateert van eind jaren tachtig en is een initiatief van CCITT (recommendation I.122).
Latere standaardisatie-inspanningen komen op het conto van het Frame Relay Forum; een samenwerkingsverband van meer dan 70 tele- en datacommunicatiebedrijven. Het pakket standaards omvat nu CCITT I.122, I.123 (de dienst), Q.922 (framebeschrijving) en Q.923 (signalering). Binnen het Amerikaanse ANSI-gebied zijn vergelijkbare standaards van kracht.

HET TIJDSCHRIFT VAN HET NEDERLANDS ELEKTRONICA- en RADIOGENOOTSCHAP 75 JAAR

1 Inleiding

Ruim een jaar geleden werd door de redactie het plan opgevat, mede met het oog op het 75-jarig jubileum van het NERG in 1995, een register op te stellen van alle artikelen die in de loop der jaren sinds 1920 in het Tijdschrift van het NERG zijn gepubliceerd.

Dat register is thans gereed en bijgewerkt tot het jaar 1995.

Op basis van de gegevens in dit nieuwe register was het mogelijk voor dit Jubileumnummer enige bijzondere aspecten uit de geschiedenis van het Tijdschrift te analyseren.

Het is overigens nu voor de derde maal gedurende het bestaan van het Tijdschrift dat er een register wordt uitgegeven.

Na het verschijnen van deel XX in 1955 is er een register uitgegeven van de delen I t/m XX; dit beslaat dus het tijdvak van 1920 t/m 1955 van het toenmalige Tijdschrift van het Nederlands Radiogenootschap. Dat register is destijds niet opgenomen in de gebonden jaargangen van het tijdschrift, zodat over de inhoud en vormgeving van dat register thans geen gegevens bekend zijn bij de redactie.

Daarna is er in 1967 een register verschenen van de delen XXI t/m XXXII en dat beslaat de periode van 1956 t/m 1967. In die periode, namelijk in 1963, werd ook de naam van het tijdschrift in overeenstemming gebracht met de nieuwe naam van het Genootschap: Tijdschrift van het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap.

In dit in 1967 uitgebrachte Register zijn de artikelen naar onderwerp gerubriceerd; er worden 41 verschillende rubrieken onderscheiden waarvan er 35 van technische aard zijn (bijvoorbeeld "modulatie", "ruis" enz.). De overige rubrieken zijn:

- Diverse Onderwerpen
- Conferenties; Congressen
- Tentoonstellingen
- Personalia
- Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap
- Opleiding; Examens.

Het register bevat voorts een alfabetisch gerangschikte lijst van auteurs.

Het zal ongetwijfeld voor de toenmalige redactie veel werk zijn geweest om met de toen beschikbare middelen dit register op te stellen. Daarbij heeft men het zich met de indeling in rubrieken niet gemakkelijk gemaakt. Daarop duidt ook de verwijzing : "zie andere rubrieken" bij de rubrieken Microgolftechniek, Ontvangst, Ontvangtoestellen en Telecommunicatie.

In 1967 kwam er op het gebied van publicaties een samenwerking tot stand met het Koninklijk Instituut van Ingenieurs (K.I.v.I.), in het bijzonder met de Sectie Telecommunicatietechniek.

Het laatste nummer van deel XXXII (juni 1967) is uitgegeven als proefnummer voor de gezamenlijke publicatie.

Gedurende de periode van juni 1967 tot aan eind 1972 komt het tijdschrift uit onder de naam "Elektronica en Telecommunicatie", gemeenschappelijke publicatie van de Sectie voor Telecommunicatietechniek van het K.I.v.I. en het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap. Leden van het NERG, geen lid zijnde van het KIVI, ontvingen een aparte omslag met het opschrift: "Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap".

In die periode worden de delen XXXIII t/m XXXVII (33 t/m 37) van het Tijdschrift uitgebracht.

Elk van deze delen bevat een per trefwoord gerubriceerd register en een appendix met de rubrieken 'Varia', 'Boekennieuws' en 'Uit het NERG'.

2 Het nieuwe register

Bij het maken van het nieuwe register stond voor ogen één compleet bestand te maken. De moeilijkheid daarbij was dat de vroeger gehanteerde rubricering zou moeten worden aangepast. Uit het oogpunt van standaardisatie zou het dan de voorkeur verdienen over te gaan op de systematiek die door de grote wetenschappelijke bibliotheken wordt gehanteerd. Dit zou echter inhouden dat aan alle in de loop der jaren verschenen publicaties trefwoorden toegekend zouden moeten worden. Wegens de omvangrijke hoeveelheid werk die dat met zich zou meebrengen heeft de redactiecommissie gemeend te moeten afzien van die aanpak.

Er is nu een register gemaakt, waarin de titelomschrijvingen van de hoofdartikelen en de auteursnamen zijn opgenomen; voor de overige informatie zijn in het register enige rubrieken opgenomen.

Bij de opzet van dit Register zijn, waar het de hoofdartikelen betreft, de regels gevolgd voor omschrijvingen van publicaties, gebaseerd op het normblad NEN 917, Literatuurverwijzingen.

Voor wat betreft de overige onderwerpen is gekozen voor een daarmee identieke structuur, waarbij de rubricering is aangehouden, zoals hiervóór vermeld voor het tweede uitgegeven register.

Als voorbeeld volgt hieronder de inhoud van Deel I.

De gegevens zijn op alfabetische volgorde van de auteursnamen gerangschikt.

Elias, G. J.,
Het electromagnetisch veld van een zender
Tijdschr. Ned. Radiogenootschap, Deel I (1922), blz. 177-203.

Ferrié, G.,
De Wetenschappelijke toepassingen der radiotelegrafie
Tijdschr. Ned. Radiogenootschap, Deel I (1921), blz. 157-166.

Huizinga, M. J.,
Een eenvoudige inrichting voor selectieve versterking
Tijdschr. Ned. Radiogenootschap, Deel I (1921), blz. 148-153.

Koomans, N.,
Hoogfrequente-telefonie draadloos en langs geleidingen volgens de octrooien van de Bell Telephone Mij
Tijdschr. Ned. Radiogenootschap, Deel I (1921), blz. 95-120.

Nordlohne, P. J. H. A. en A. J. Odinot,

Radiotechnische Teekeningen
Tijdschr. Ned. Radiogenootschap, Deel I (1922), blz. 167-175.

Pol, B. van der,
De amplitude van vrije en gedwongen triode-trillingen
Tijdschr. Ned. Radiogenootschap, Deel I (1920), blz. 3-31.

Pol, B. van der,
Trillingshysteresis bij een triode-generator met twee graden van vrijheid
Tijdschr. Ned. Radiogenootschap, Deel I (1921), blz. 125-147.

Schäffer, W.,
Radio-Telefonie met Triode-zenders
Tijdschr. Ned. Radiogenootschap, Deel I (1920), blz. 33-67.

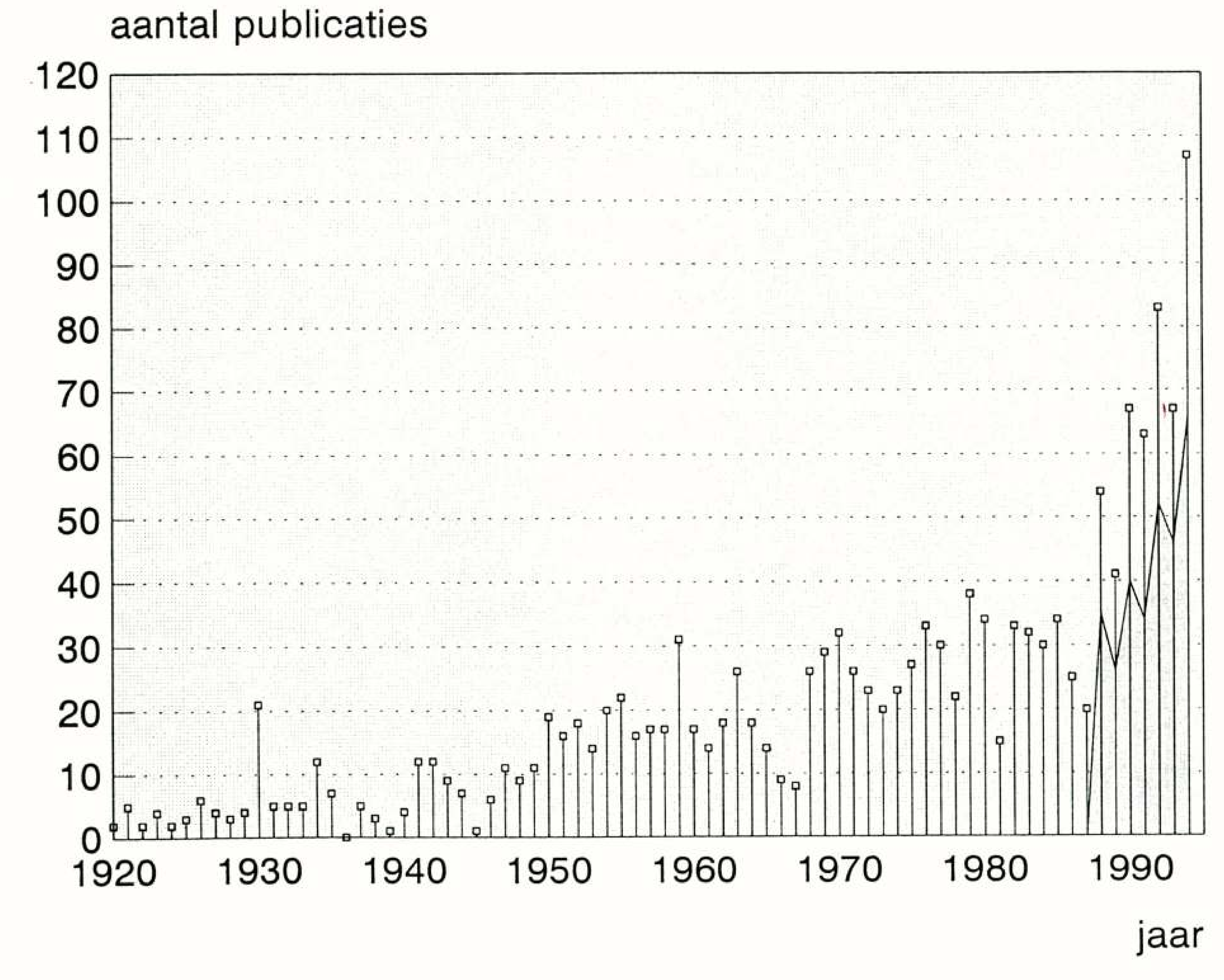
Voogt, A. H. de,
Het Radio-peilen
Tijdschr. Ned. Radiogenootschap, Deel I (1921), blz. 74-92.

Redactie,
Jaarverslag over 1920
Tijdschr. Ned. Radiogenootschap, Deel I (1921), blz. 71-73.

Redactie,
Boekbespreking
Tijdschr. Ned. Radiogenootschap, Deel I(1921), blz. 121, 154 ,176.

Tot aan het jaar 1947 loopt de nummering van de opeenvolgende delen van het Tijdschrift niet synchroon met het jaartal, hetgeen blijkt uit de volgende tabel.

Deel nummer	jaar	aantal publicaties
I	1920	2
	1921	7
	1922	2
II	1923	4
	1924	2
	1925	3
III	1926	6
	1927	4
IV	1928	3
	1929	4
	1930	5
JUBILEUMNUMMER	1930	15
V	1930	4
	1931	5
	1932	4



Figuur 1: Overzicht aantal publicaties per jaar (inclusief samenvattingen proefschriften)

Deel nummer	jaar	aantal publicaties
VI	1932	1
	1933	5
	1934	5
VII	1934	6
	1935	7
	1937	4
	1938	1
VIII	1934	1
	1937	1
	1938	2
	1939	1
	1940	4
IX	1941	12
	1942	5
X	1942	7
	1943	9
XI	1944	7
	1945	1
	1946	6

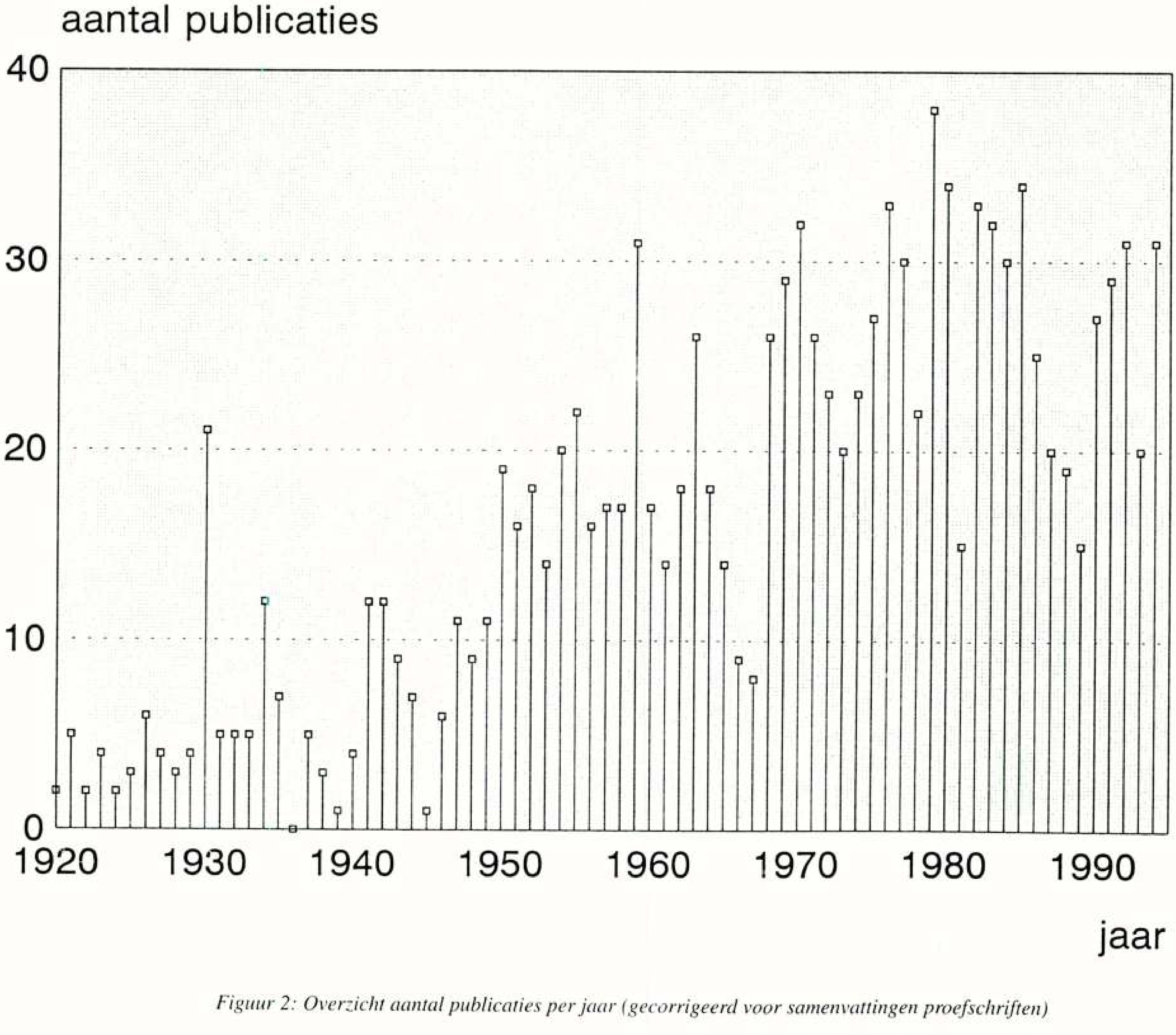
Tabel 1

Vanaf het jaar 1947 loopt de nummering wèl synchroon met het jaartal, d.w.z. Deel XII - 1947, Deel XIII - 1948, etc.

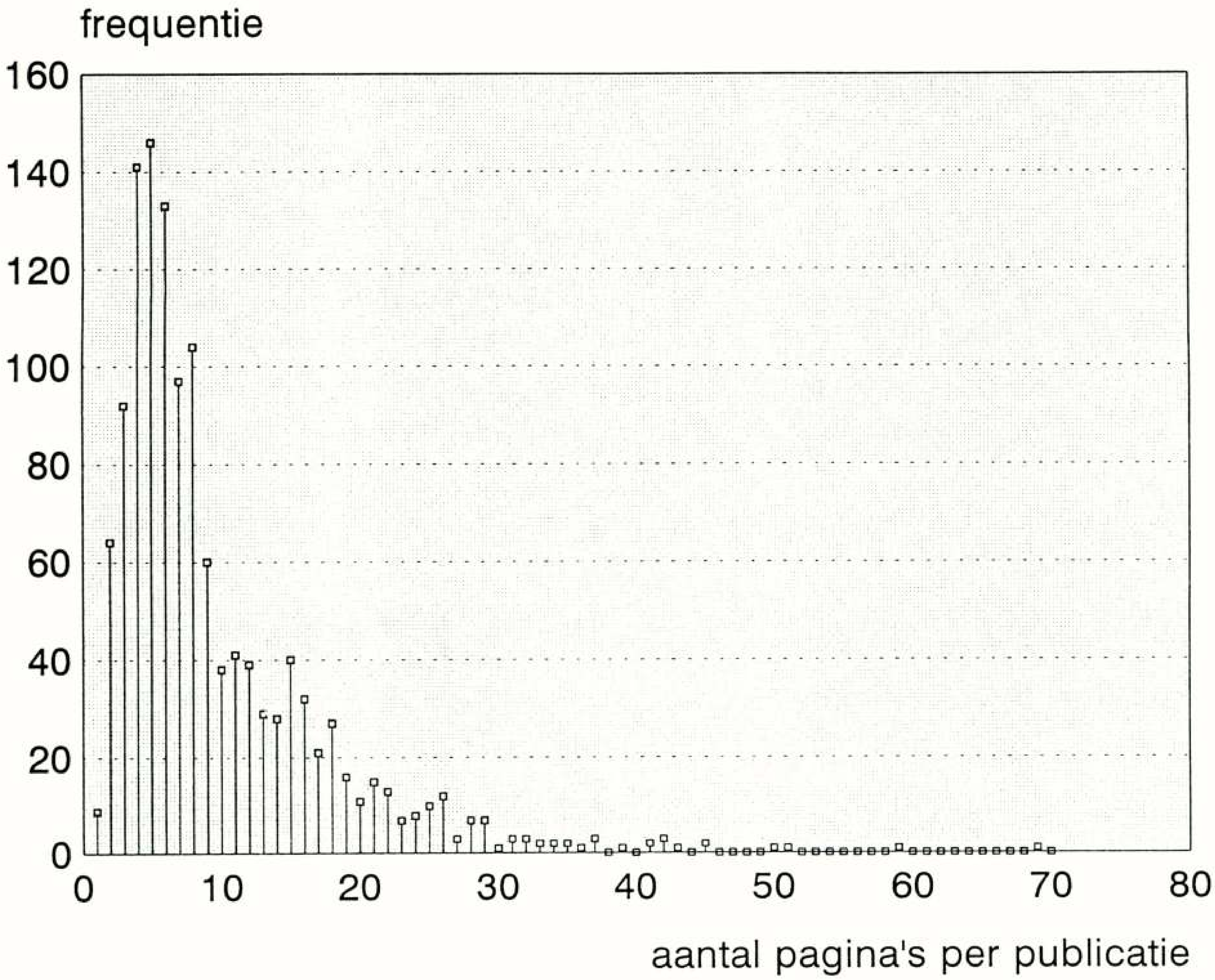
3 Enige overzichten

De basis-versie van het register is een bestand waarin de afzonderlijke gegevens toegankelijk zijn voor de computer, zodat op vrij eenvoudige wijze enige overzichten konden worden gemaakt.
Zo lag natuurlijk de vraag voor de hand naar een overzicht van het aantal publicaties per jaar. In figuur 1 is dat overzicht in een grafiek weergegeven en het is interessant die aan een nadere beschouwing te onderwerpen.

Er is een zeer duidelijke toename van het aantal uitgebrachte publicaties per jaar vast te stellen. Die toename houdt uiteraard verband met de toename van het ledenbestand van het genootschap. Zo telde in het jaar 1922 het genootschap 54 leden, en in 1994: 725, een verhouding van 1: 13,4.
Op het eerste gezicht komt die verhouding redelijk overeen met de toename van het aantal publicaties in het tijdschrift over die periode. Daarbij dient echter het volgende te worden opgemerkt. Vanaf het jaar 1988 wordt het laatste nummer van de jaargang gewijd aan samenvattingen van in dat jaar verschenen proefschriften bij de Technische Universiteiten in Nederland; in het register is zo'n samenvatting ook als publicatie meegerekend. Het effect daarvan is in figuur 1 als een geärceerde opppervlakte aangegeven.
Wanneer men de samenvattingen van proefschriften buiten beschouwing laat krijgt men de grafiek van figuur 2, waarin op een andere schaal een overzicht is gegeven van het aantal publicaties.



Figuur 2: Overzicht aantal publicaties per jaar (gecorrigeerd voor samenvattingen proefschriften)



Figuur 3: Frequentie van het aantal pagina's van publicaties

In het jaar 1930 wordt het 10-jarig jubileum van het genootschap gevierd en wordt er een speciaal jubileumnummer uitgegeven, met daarin 13 bijdragen die in het overzicht van Figuur 2 als artikel zijn meegeteld. Daardoor valt het jaar 1930 in dit overzicht op met een relatief hoog aantal publicaties.

Er kan worden opgemerkt dat er ook gedurende de Tweede Wereldoorlog nog artikelen werden geschreven.

Het jaar 1980 was een vruchtbaar jaar; in dat jaar werd ook een jubileumnummer van het tijdschrift uitgegeven, gewijd aan het 60-jarig jubileum van het Genootschap.

Bij het doornemen van de lijst met auteursnamen valt het op dat er door sommige auteurs veel artikelen zijn geschreven.

Het computerbestand bevat in totaal 1768 records, waarvan 1520 records van artikelen die door *auteurs* zijn geschreven; het verschil wordt gevormd door redactionele artikelen en mededelingen van algemene aard.

Die genoemde 1520 records zijn onderzocht op de frequentie van de auteursnamen.

Tabel 2 geeft het resultaat daarvan.

1	auteur	met	27 publicaties		(B. v.d. Pol)
1	auteur	met	18	"	(G.J. Elias)
2	auteurs	met	14	"	(B.D.H. Tellegen, F.L.H.M. Stumpers)
1	auteur	met	13	"	(J.W. Alexander)
1	auteur	met	10	"	(J.J. Geluk)
1	auteur	met	9	"	(J. Davidse)
2	auteurs	met	8	"	(B. v. Dijl, E. Goldbohm)
5	auteurs	met	6	"	
2	auteurs	met	5	"	
13	auteurs	met	4	"	
29	auteurs	met	3	"	
119	auteurs	met	2	"	

Tabel 2

Hierbij zijn ook de publicaties meegeteld, die de auteurs in samenwerking met anderen hebben geschreven.

In tabel 3 wordt een overzicht gegeven van artikelen, waaraan méér dan één auteursnaam is verbonden.

85	publicaties, geschreven door	2 auteurs
20	publicaties, geschreven door	3 auteurs
3	publicaties, geschreven door	4 auteurs
1	publicatie, geschreven door	7 auteurs.

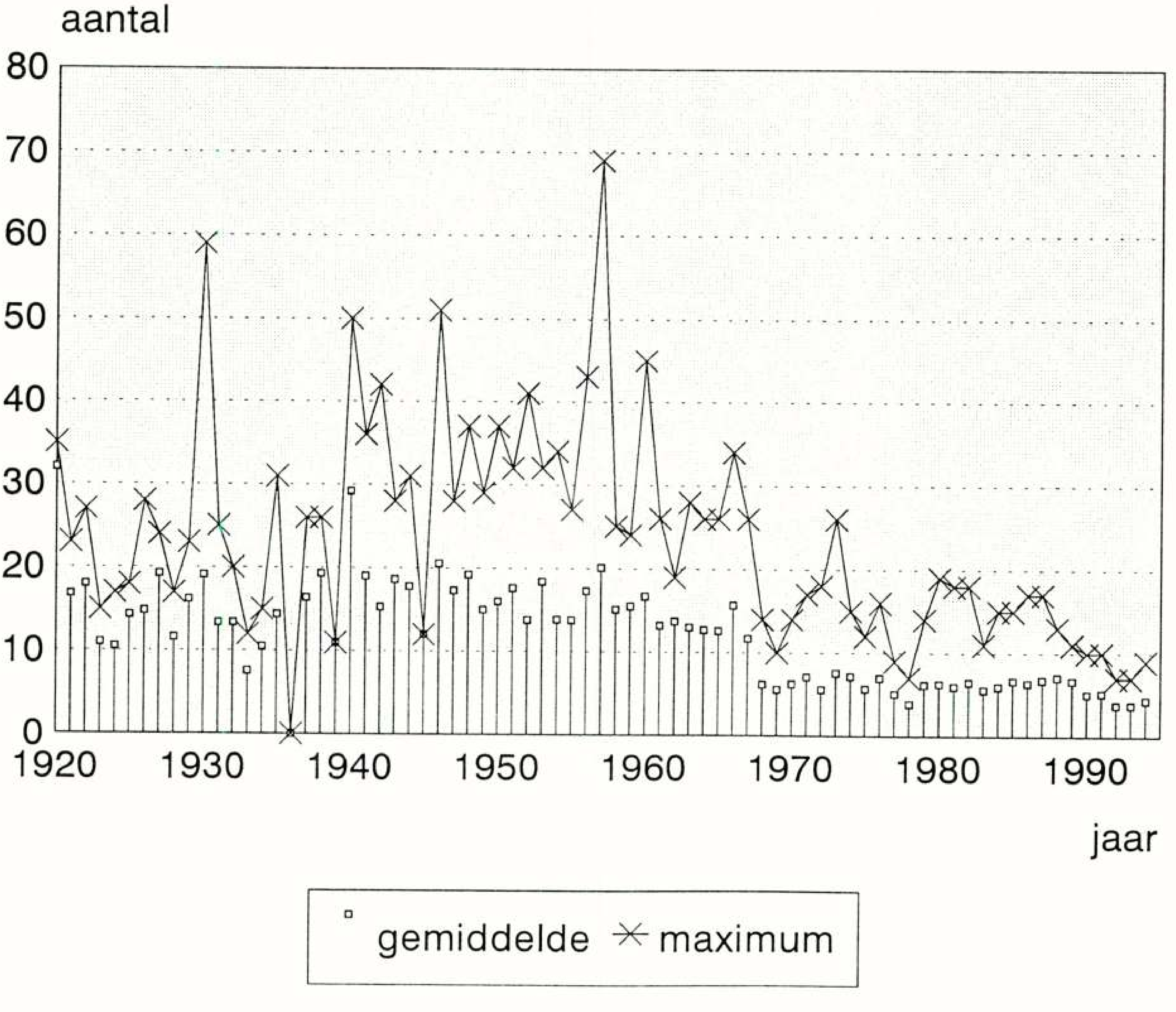
Tabel 3

Een ander interessant aspect is de lengte van de publicaties, uitgedrukt in het aantal pagina's. In figuur 3 is aangegeven de frequentie (het aantal publicaties), als functie van het aantal pagina's per publicatie. Het aantal publicaties met een lengte van 5 pagina's is het grootst.

Het record is een publicatie ter lengte van 69 pagina's.
Het betreft het artikel met de titel "Troposferische voortplanting van VHF- en UHF-radiogolven ver voorbij de horizon en enkele praktische toepassingen" door S. Gratama (Deel XXII 1957).
In figuur 4 is aangegeven hoe het verloop is van het jaarlijkse gemiddelde aantal pagina's per artikel en tevens is voor het betreffende jaar het aantal pagina's van het langste artikel aangegeven.

De samenvattingen van proefschriften zijn hierbij buiten beschouwing gebleven.
Ten aanzien van de gemiddelde- en maximale lengte van publicaties in het Tijdschrift, uitgedrukt in het aantal pagina's, is er een duidelijke afnemende trend waarneembaar. Na 1973 verschijnen er geen publicaties meer die langer zijn dan 20 pagina's.
Er dient te worden opgemerkt, dat er in de loop der jaren enige wijzigingen in de grafische lay-out van het tijdschrift zijn geweest, die invloed hebben op het aantal afgedrukte tekens per bladzijde.
In de periode van 1920 tot en met 1967 werden de tekstregels over de volle paginabreedte afgedrukt.

Vanaf 1968 tot en met het jaar 1972 verscheen, zoals eerder vermeld, het tijdschrift als gemeenschappelijke uitgave van NERG en het K.I.V.I., Sectie voor Telecommunicatie onder de naam 'Elektronica en Telecommunicatie'. Daarbij wordt overgegaan op een geheel andere lay-out; het formaat van de bladspiegel is groter, de tekst wordt in twee kolommen afgedrukt, men gebruikt een ander lettertype en het aantal regels per bladzijde neemt toe van 42 naar 64.
Vanaf 1973 verschijnt het tijdschrift onder de huidige naam en wordt overgegaan op een aangepaste lay-out. De uitvoering in twee tekstkolommen blijft gehandhaafd. De tijdschriften doorbladerend ziet men tot het jaar 1975 een uniforme lay-out; naar men moet aannemen vereiste dat veel typewerk. Immers in die jaren werden de teksten door de auteurs op papier in getypte vorm aangeleverd.
In de periode vanaf 1976 tot ca. 1991 heeft men die strakke uniformiteit niet gehandhaafd. Men heeft er in die periode van afgezien alle teksten met afwijkende lay-out of schriftsoort over te typen in de standaard lay-out.
Vanaf 1991 wordt er door de auteurs vrijwel uitsluitend met diskettes gewerkt. Met de huidige mogelijkheden van tekst-opmaak is het vrij eenvoudig een uniforme lay-out voor alle publicaties aan te houden.
Met als referentie de periode 1920 - 1967 kunnen er met betrekking tot de invloed van de lay-out globale waarden voor de correctie van het aantal pagina's per publicatie worden bepaald. In tabel 4 zijn de gegevens opgenomen die hebben gediend voor de bepaling van de correctiefactor.



Figuur 4: Het gemiddelde en maximale aantal pagina's per artikel

Periode	aantal regels per pagina	aantal tekens per regel	aantal kolommen	correctie factor	gewogen correctie factor
1920-1967	42	62	1	-	-
1968-1972	64	2 x 56	2	2,75	1,65
1973-1975	54	2 x 51	2	2,11	1,26
1976-1991	56	2 x 54	2	2,32	1,39
1991-heden	57	2 x 70	2	3,06	1,83

Tabel 4

Bij het in rekening brengen van een correctiefactor dient ook nog te worden meegewogen dat er behalve tekst ook figuren zijn afgedrukt. Wanneer men voor de figuren geen correctiefactor in rekening brengt en men er van uitgaat dat gemiddeld 40% van de bedrukte opppervlakte in beslag wordt genomen door figuren, komt men tot de waarden van de gewogen correctiefactor die in tabel 4 is aangegeven.

In figuur 5 is het effect van die correctie op het gemiddelde van het aantal pagina's per publicatie te zien.

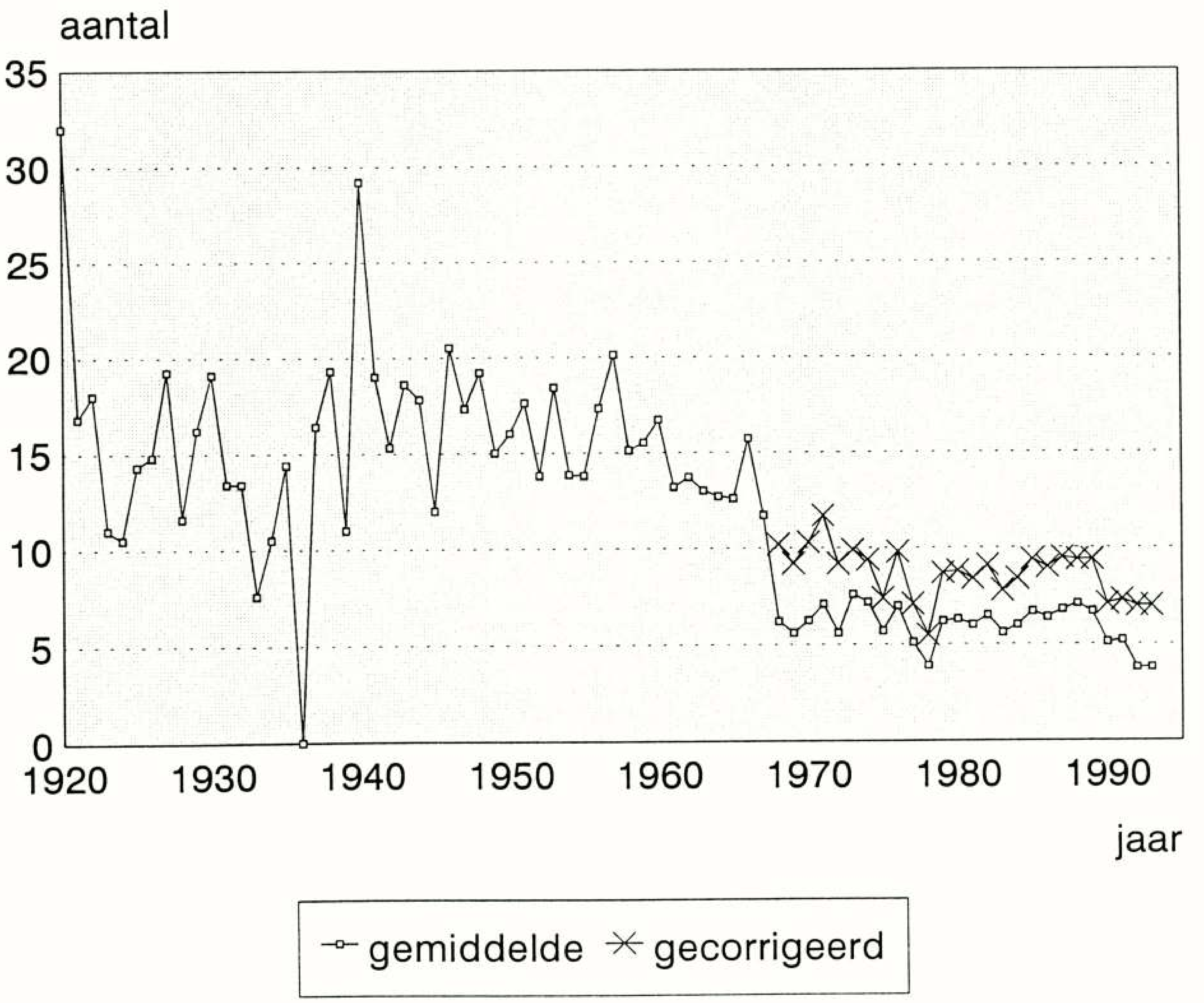
De omvang van het tijdschrift, uitgedrukt in het aantal pagina's per deel, is in figuur 6 in beeld gebracht.

Het in dit artikel beschreven computerbestand biedt de mogelijkheid om enige bewerkingen te doen met de woorden van de *titelomschrijvingen* uit het register.
Zo geeft figuur 7 het resultaat van de cumulatieve tellingen van de woorden "Onderzoek", "Ontwerp" en "Architectuur" van de titelomschrijvingen van artikelen en de samenvattingen van proefschriften.

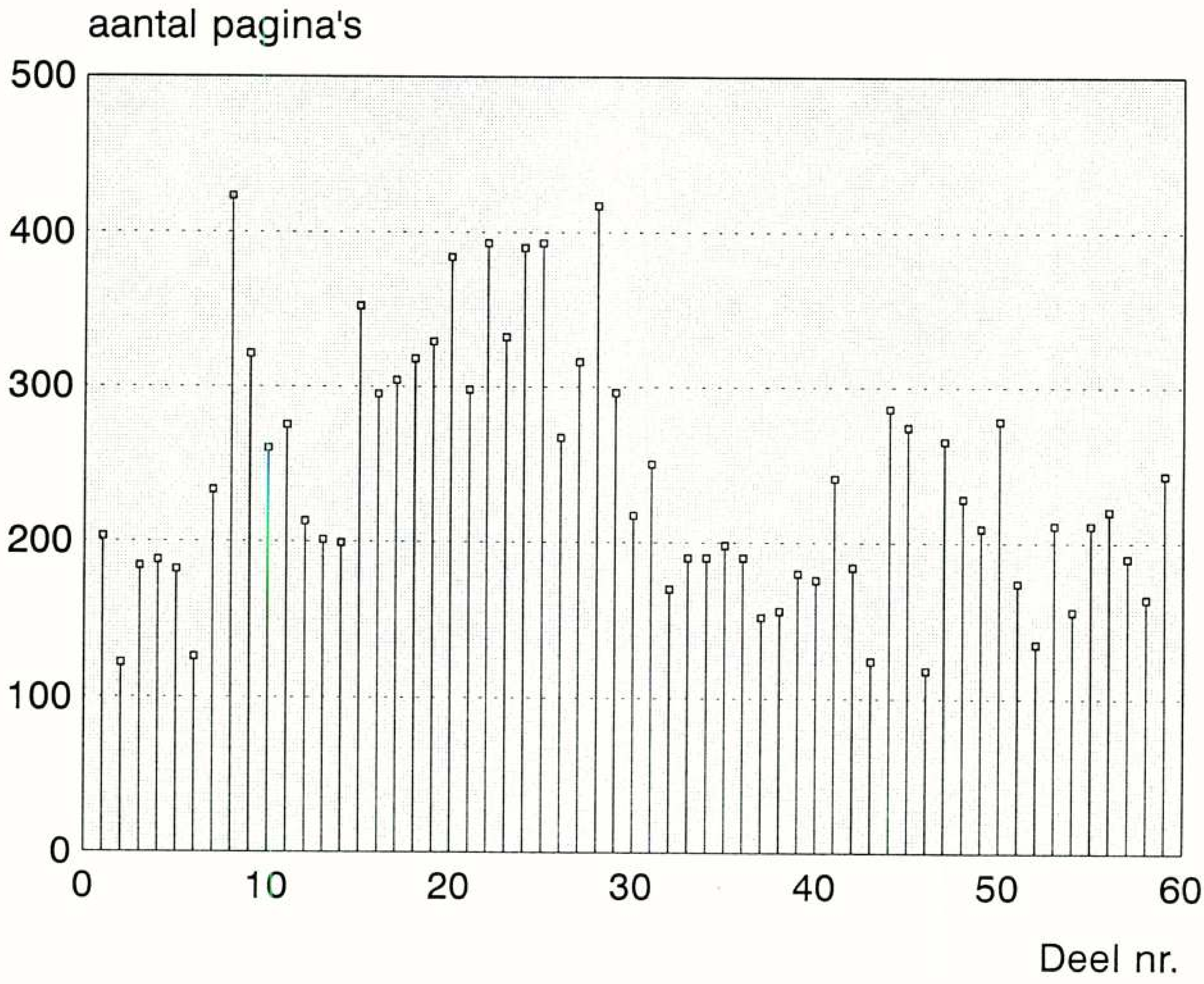
Het valt op dat in de jaren vóór 1940 de woorden "onderzoek" en "ontwerp" niet in de titels van publicaties voorkomen.
Het woord "architectuur" hangt duidelijk samen met ontwikkelingen in de laatste jaren.
Het zou overigens wat speculatief zijn om aan de uitkomst van deze telling conclusies te verbinden. Om dat enigszins verantwoord te kunnen doen zou er een systeem voor de toekenning van steekwoorden toegepast moeten worden. Zoals reeds eerder vermeld is daar, wegens de grote hoeveelheid werk die dat met zich mee zou brengen, van afgezien.

4. De toegankelijkheid van de informatie

Hoewel het in dit artikel beschreven register een bruikbaar overzicht verschaft van de inhoud van het Tijdschrift van het NERG over de gehele bestaansperiode van het Genootschap, is er in feite toch nog slechts een be-



Figuur 5: Het gemiddelde aantal pagina's per artikel met correctie voor de grafische lay-out



Figuur 6: De omvang van het tijdschrift, uitgedrukt in het aantal pagina's per deel

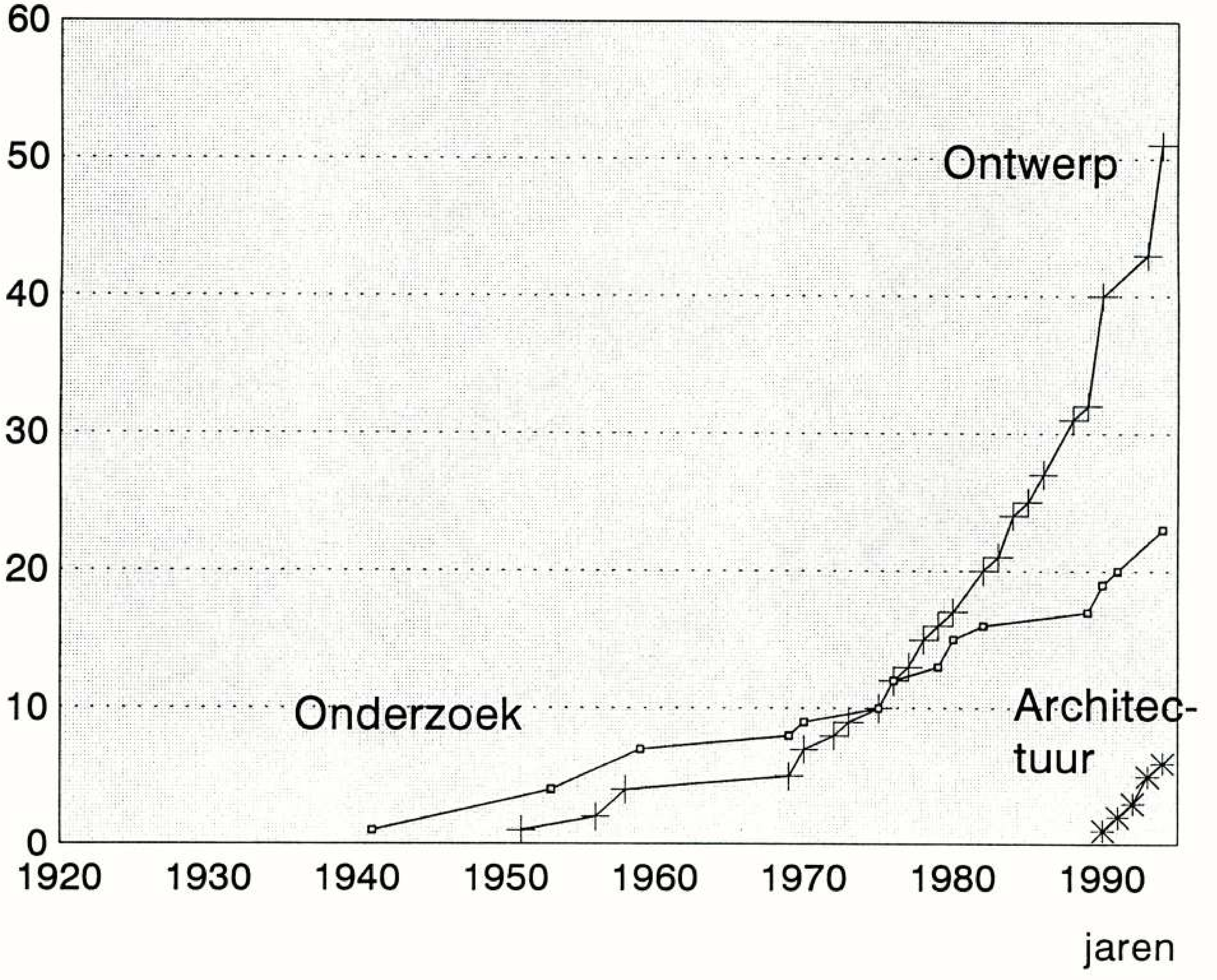
perkte toegankelijkheid tot die literatuur. Voor zover thans bij de redactie bekend, zijn er slechts drie complete versies van alle jaargangen van het Tijdschrift. Eén daarvan werd steeds beheerd door de hoofdredacteur van het Tijdschrift en dat is tot op heden nog zo. Voorts zijn er complete versies aanwezig bij de Centrale Bibliotheek van de Technische Universiteit Delft en bij het Algemeen Rijksarchief te Den Haag; deze versies zijn dus voor een ieder vrij toegankelijk.

In het Depot van Nederlandse Publicaties & Nederlandse Bibliografie van de Koninklijke Bibliotheek te Den Haag zijn de jaargangen vanaf 1988 aanwezig.

De redactie zou het zeer op prijs stellen informatie te ontvangen over de eventuele beschikbaarheid van vroegere jaargangen van het Tijdschrift met als doelstelling het vormen van nog één of meer complete jaargangen.

Met de uitgave van het bij dit Jubileumnummer bijgevoegde Register hoopt de redactie te hebben bijgedragen aan de verruiming van de toegankelijkheid van de voor velen interessante publicaties uit verleden en heden.

Ing. A.A. Spanjersberg
hoofdredacteur



Figuur 7: Cumulatieve telling van woorden uit titels.

HERINNERINGEN

De voorzitter van de commissie die zich heeft bezig gehouden met de voorbereidingen van het 75-jarig jubileum van het NERG, ir. C.Th. Koole, heeft enige NERG-leden die kunnen bogen op een rijke en vooral gevarieerde ervaring gevraagd om enige herinneringen of anecdotes op papier te willen zetten.

Prof.ir. I.J. Boxma

Toen in 1954 de eerste PNP-transistoren beschikbaar kwamen, probeerden we op het Physisch Laboratorium RVO-TNO in de groep "Elektronisch rekenen", die verder bestond uit de ingenieurs A.J. Leenhouts en E.W. Gröneveld en de technici A. Bruin en H. Stap, een eerder met radiobuizen samengesteld rekenapparaat na te bouwen met deze transistoren. Op een morgen slaagde deze poging en het apparaat rekende geheel tot onze tevredenheid. Voldaan gingen we in de kantine koffie drinken. Enige collega's gingen daarna mee terug naar het laboratorium om met eigen ogen een met transistoren gebouwd apparaat in werking te zien. Helaas, het apparaat weigerde. Maar bij het onderzoek was niets verkeerds te ontdekken en even later werkte alles weer normaal.
De volgende dag herhaalde dit zich, zodat we gingen denken, dat de transistoren er bezwaar tegen hadden dat we weg gingen om koffie te drinken.
Enige dagen later vonden we de oplossing van het raadsel. In de koffiepauze scheen enige tijd zonlicht op de, toen nog geheel onbeklede, transistoren, waarbij deze als fotocellen gingen reageren. En zodra de zon niet meer op het apparaat scheen, werkte alles weer normaal.
De volgende generatie transistoren was bedekt met een zwarte laklaag, waarmee dit probleem uit de wereld was.

Prof.dr.ir. J.Davidse
Erelid NERG

De Jubileumcommissie vraagt om verhalen en anekdotes die voor lezers van het Tijdschrift interessant zijn. Wie zal beoordelen of aan zo'n criterium is voldaan? Na herhaald aandringen waag ik het er op enkele enigszins onverwachte ervaringen aan de vergetelheid te ontrukken.

1. Professor Von Weiler had de reputatie zijn colleges niet in detail voor te bereiden; hij gaf de voorkeur aan improvisatie en dat gaf wel eens problemen. Op zekere dag stond de behandeling van golfvoortplanting via rechthoekige golfgeleiders op het programma. Hij begon met het op het bord zetten van de vergelijkingen van Maxwell. Na uitsplitsing in x,y en z coördinaten stonden er zes partiële differentiaalvergelijkingen op het bord. Er volgde, niet zonder gesteun, een enorme rekenpartij. Het had er even de schijn van dat de hele berekening zou vastlopen. Maar tenslotte kwamen er eenvoudige uitdrukkingen te voorschijn. Een student stond op en vroeg met de in die tijd gepaste bescheidenheid het woord: Professor, u hebt de uitgangsvergelijkingen teruggevonden. De professor bestudeerde even zijn resultaat, constateerde de juistheid van de waarneming en riep vervolgens zeer verheugd: ongelooflijk, blijkbaar heb ik in die hele rekenpartij geen rekenfout gemaakt.

2. Schrijver dezes gebruikte bij een collegedemonstratie eens een TV-camera en een monitor om de werking van een bepaalde schakeling te demonstreren. Er was blijkbaar iets niet in orde. Terwijl hoogleraar en college-assistent zich haastten om de onregelmatigheid op te sporen, had binnen een halve minuut de student die net voor de camera zat een flink bord gereed met daarop de beeldschermvullende tekst: EVEN GEDULD, A.U.B. Grote hilariteit, maar het hielp: even later werkte alles naar behoren.

3. Tijdens zijn militaire diensttijd moest schrijver dezes een radio-oefening organiseren. Tijdens een inspectietocht langs de bij het verbindingsnet betrokken radioposten bleek één der posten geen goede verbinding te kunnen maken. De antenne, een verticale getuide mast, was correct opgezet. Bij de uitrusting behoorde ook een noodantenne, bestaande uit een uitrolbare litzedraad. Ik gaf in een opwelling van Experimentierfreudigkeit het advies die draad boven in een boom op een kwartgolflengte afstand van de mast als reflector te gebruiken, hetgeen in het gunstigste geval 3dB antenneversterking zou kunnen opleveren. Het werkte fantastisch, maar ik weet nog steeds niet wie het meest verbaasd was, de bedenker van de truc of de bemanning van de post!

4. In het voorjaar van 1956 maakte een grote CCIR-delegatie een tournee langs een aantal "centres of excelllence" op het gebied van kleuren-TV. Philips wilde natuurlijk ook van de partij zijn, maar het was wel een huzarenstukje, want we waren allerminst klaar toen de tournee in de USA al begonnen was. Er werd tot diep in de nacht overwerk verricht. Elke avond kwam een lid van de bewakingsdienst langs. Die mensen hadden instructie zich onder geen beding te encanailleren met de labmensen. De eerste avond werd een aangeboden kop koffie dan ook volgens protocol afgeslagen. De tweede avond was een monitor in bedrijf en dat wekte belangstelling. Zal ik u eens een kleine demonstratie kleuren-TV geven? Daar kon geen plichtsbesef tegenop Onder het genot van nu geaccepteerde koffie vond de verboden verbroedering plaats. De volgende avonden was de experimenteerkamer een gezochte pleisterplaats. Het heeft het bedrijf geen schade opgeleverd.

Prof.ir. E. Goldbohm FIEE

Bomans: "Ik geloof, dat wie intens wil leven zich een zekere beperking moet opleggen. Het water staat hoger naarmate het gebied van bevloeiïng geringer is!"

Toen ik de leerstoel Electronische Navigatie THD in 1974 betrok, kreeg ik de kamer van mijn voorganger, prof.jhr.ir.J.L.W.C. von Weiler toegewezen, welke ik elke vrijdag zeer tot mijn genoegen mocht delen met prof.dr. J. Geluk. Amusante en wetenschappelijke discussies met hem en prof.dr. J.L. Bordewijk, onze vakgroep voorzitter, verleenden glans aan deze interessante periode.
Terugkomend op de persoon Von Weiler, zoals deze nog onlangs door ir. M. Staal werd geprofileerd tijdens zijn voordracht voor het Bosscha Genootschap, hij droeg de kenmerken van de uitvinder. Hij hield van het onverwachte, was creatief en had een onconventionele vrijheidsbehoefte. Hij kon

daar soms met humor blijk van geven. Het begrip serendipity omvat deze eigenschappen!
Zo bracht hij eens op een NERG Symposium, waarvoor hij als inleider was gevraagd, de dagvoorzitter tot wanhoop door ruim een half uur te laat te verschijnen. De plaats innemend van de volgende spreker, die reeds begonnen was, opende hij zijn voordracht met een laconiek grapje. Later tijdens een Radarsymposium van het NERG bij FEL-TNO, waarvan hij vele jaren voorzitter was, wist hij de toegestane tijd ver te overschrijden, deze vullend met anecdotes en een babbeltje.

Soms leek het of hij de gave van een ziener had. Zo hadden wij tijdens het eerste lustrum van het Nederlands Radar Proefstation in 1952 diverse demo's opgetuigd voor de vele gasten, die in groepjes werden rondgeleid langs de opstellingen. Ik was toen verantwoordelijk voor de antennes, zenders en microgolfsystemen en had een opstelling gemaakt met een golfpijpbrug om de diëlektrische eigenschappen van diëlectrika te bepalen. Dat was nodig om de stralingsdiagrammen van een met diëlektricum gevulde hoornbelichter te bepalen. De avond tevoren, tijdens een hevig onweer, had ik alles beproefd en in orde bevonden. Toen de groep met von Weiler en Houtsmuller zich de opstelling had laten uitleggen merkte von Weiler op, dat hij een andere waarde n.l. 3 in plaats van de door mij geschatte 2,2 voor de diëlektrische konstante verwachtte. Toen ik de meting verrichtte kreeg hij tot mijn grote verrassing gelijk. Direkt daarna heb ik de opstelling ontmanteld en ja hoor, daar vond ik de grote meikever, die zich na het onweer in een golfpijp had genesteld. Dus had ik de diëlektrische konstante van de meikever in mijn meting meegenomen. De groep verliet glimlachend mijn demo.

In mei 1970 woonden prof. von Weiler met zijn vrouw en ir.J.A. Smit en ondergetekende, beide van het Christiaan Huygenslab. een AGARD Symposium bij in Istanbul. Ir. Smit hield daar een voordracht over de theorie van Ruisradar (door mij in 1959 gepatenteerd), ondersteund door de beschrijving van een experimenteel bewijs. (Zie "De Ingenieur" Jaargang 83 no. 32, 13 aug. '71). Wij hadden een prachtig hotel "Tarabya" aan de Bosporus, waar luxueuze Russische cruiseschepen en grimmig uitziende onderzeeboten een contrasterend beeld leverden. Tijdens een koffiepauze adviseerde Mevr. von Weiler de Grand Bazar eens te bezoeken, waar voordelige gouden sieraden misschien iets konden zijn om onze dames te verrassen. Wij gaven gevolg aan dit advies en bij wijze van test vroeg ik een in zijn deur hangende juwelier de prijs van een Wilhelmina gouden tientje, dat in zijn etalage lag en waarvan ik de nederlandse waarde kende. Het tientje werd gewogen en hij noemde een veel hogere prijs dan ik verwacht had. Na deze test probeerde hij ons colliers aan te praten. Toen hij ook daarmee geen succes had vroeg hij plotseling of wij een kostbare diamant voor hem mee wilden nemen naar Hoofddorp waar zijn broer woonde, die bij een Amsterdamse juwelier werkte. Als buitenlandse congresgangers zouden wij niet door de douane worden lastig gevallen en dus was de missie zonder risico. Wij zouden na oplevering 10% van de waarde kunnen ontvangen en dat was toen meer dan een jaarsalaris. Toen wij er desondanks niet op in gingen schudde hij zijn hoofd over zulke domme Ollanders, die zijn broer in Ottorp niet blij wilden maken.

Prof.ir. E.W. Gröneveld

In november 1950 kwam ik, aanvankelijk als dienstplichtig militair, bij het Physisch Laboratorium RVO-TNO in Den Haag waar prof.ir. J.L. van Soest directeur was. Ik werkte bij de groep "Elektronisch rekenen" met ir.IJ. Boxma, ir. A.J. Leenhouts en met H.Stap en A.Bruin, beiden radiotechnicus N.R.G. De groep groeide later verder uit. We richtten ons op digitale rekentoestellen ten behoeve van vooral vuurleiding. Ons werk was zowel de elektronica inclusief de AD-omzetting als de programmering en een hernieuwde analyse van het vuurleidingsprobleem.
De elektronica was aanvankelijk gebaseerd op de elektronenbuis. In 1953 experimenteerden we met puntcontacttransistoren, heel spannend, en in 1954/55 kwam de lagentransistor. Na de ontwikkeling van een aantal basisschakelingen was de tijd rijp deze te toetsen in een bescheiden rekenapparaat. Het werd een toestel met een vast programma maar zonder magnetisch kerngeheugen, de besturing daarvan lukte nog niet met de toen beschikbare transistoren.
Toen de bouw onder leiding van A. Bruin gereed was werd de spanning ingeschakeld: het toestel functioneerde niet. We waren niet verontrust want bij buizenapparaten (en nog meer bij puntcontacten) gebeurde dat ook. Oorzaken: capacitieve overspraak en onvoldoende beheersing van signaalvormen. Dat laatste hing samen met de bedradingscapaciteiten, met de spreiding in buiseigenschappen vooral bij lage anodespanningen en hoge roosterstromen en met de terughoudendheid die we, gezien de beoogde toepassing, aan de dag legden bij het gebruik van buizen. Maar nu was het anders, ondanks ons terughoudend transistorgebruik.
We pasten diodes toe van Intermetall, snel en met een lage doorlaatweerstand. Bij veel van deze diodes bleek de doorlaatrichting fout aangegeven te zijn, deze waren daarom fout gemonteerd. Herstel was niet zo moeilijk en daarna rekende ons toestel probleemloos. We voerden de voedingsspanning op van 10 naar 12 volt en reduceerden die vervolgens tot 8 volt: geen verandering. Klaar. Een halve dag wisten we niet wat we moesten doen. Een nieuw aspect van het komende halfgeleidertijdperk drong tot ons door.

Een kanttekening is nog op zijn plaats. Spreiding in de transistoreigenschappen kan toch niet onbelangrijk zijn. Inderdaad, die spreiding leidde er toe dat sommige uitgestuurde transistoren zo ver overstuurd waren dat ze als gevolg van hole-storage erg moeilijk af te schakelen waren en dat leidt dan tot trage schakelingen. Maar dat wisten we toen nog niet.

Ir. F. de Jager
Erelid NERG

1. In Londen was kort na de oorlog een tentoonstelling gewijd aan de beginselen van de fysica. Daarbij was ook een maquette opgesteld om de bouw van de verschillende atomen door middel van lampjes te demonstreren. Een van de hierin aanwezige lampjes had het echter begeven en daarom vertelde ik de dienstdoende suppoost dat het waterstofatoom een electron miste. Hij keek mij echter meewarig aan en zei toen:
"Well, Sir ... I think that would not be very serious, would it?"

2. Voor de man die bij de PTT kabelmetingen uitvoerde was het een raadsel waarom de elektrisch gemeten lengte van een telefoonkabel in Zeeland zoveel groter was dan de werkelijke afstand tussen begin- en eindpunt. Door een toevallige ontmoeting met iemand die tijdens de bezetting in deze streek gewoond had kwam jaren later de oorzaak aan het licht. De Duitsers hadden in de oorlog geëist dat er een telefoon-aansluiting zou komen bij een ver afgelegen geschutsopstelling en zij hadden ook de daartoe benodigde kabel geleverd. Door deze kabel met veel lussen door de weilanden te leggen had de installatieploeg de Duitsers kunnen overtuigen dat de geleverde kabel te kort was en pas na de oorlog werd de kabel verlengd tot een nabijgelegen dorp. Alle sporen van deze sabotagedaad waren zorgvuldig uitgewist - alleen de elektrische eigenschappen van de kabel had men niet kunnen veranderen.

3. Met enige trots demonstreerde Philips het eerste draagbare röntgenapparaat tijdens een lezing in Parijs. Het effect werd echter grotendeels bedorven door

de potige Fransman die de in twee koffers verpakte apparatuur binnenbracht en daarna met een hand zijn voorhoofd afveegde, onder de uitroep "Comme c'est lourd!"
Informatie Prof. Roeterink

4. Het eerste radiotoestel met ingebouwde luidspreker van Philips was in het laboratorium uitvoerig op zijn elektrische en akoestische eigenschappen getest. Niemand had daarbij echter bemerkt dat het toestel topzwaar was. Om het toestel in evenwicht te houden werd daarom bij de eerste serie een tegengewicht van lood aangebracht.
Informatie Prof. Roeterink

5. Gehoord van een vertaler tijdens een internationale conferentie over telecommunicatie:
"I can't translate the question because the speaker d d not use the microphone. But the answer to the question is "No".

6. Bij de eerste experimentele uitzendingen van kleurentelevisie vanuit Eindhoven werd bij de zender de kleur nog met de hand ingesteld. Het testbeeld was daarbij afkomstig van een voor de camera opgestelde schaal met fruit. Toen het de dienstdoende technicus op een dag maar niet wou lukken om de juiste kleurinstelling te vinden ging hij ten einde raad poolshoogte nemen bij de camera, om te ontdekken dat iemand een blauw geverfde banaan op de fruitschaal gelegd had.

7. Een jonge, enthousiaste technicus die pas in het laboratorium van Philips was aangenomen had zijn eerste experimentele schakeling gebouwd. Bij het inschakelen van de spanning kwam er echter rook uit de apparatuur. Daarom schakelde hij onmiddellijk de spanning uit en begon met een minutieus onderzoek van zijn proefopstelling. Dit herhaalde zich nog enkele malen tot hij tenslotte de fout vond: een klein gaatje in de laboratoriumtafel waardoor, via een slangetje, door een collega op de juiste momenten rook geblazen werd.

Prof.dr.ir. J. Pieter M. Schalkwijk
Erelid NERG

FEEDBACK

Mijn eerste publicatie in het NERG tijdschrift was een kort overzicht van mijn Stanford proefschrift uit 1965. Later hoorde ik van mijn vader, een van de eerste NERG leden, dat de redaktie het verhaal nogal wiskundig had gevonden en het ter recentie naar een mathemaat had gestuurd. Publicatie vond plaats in Deel XXXI nr.3 van maart 1966. Het onderwerp was de transmissie van informatie over kanalen met "feedback". Het gehele proefschrift is opgenomen in de IEEE Transactions on Information Theory en won de "1967 best paper award" van de IEEE Information Theory Group. Deze Award werd door prof. Claude Shannon uitgereikt tijdens een bijeenkomst van de Boston sectie van de IEEE, waar prof. Toby Berger een voordracht over data compressie hield. Na afloop werden Shannon, Toby, mijn vrouw en ik door de voorzitter van de Boston sectie van de IEEE voor diner uitgenodigd. Shannon vertelde over zijn eigen interesse in feedback, waarover dadelijk meer. Toby en ik zijn sinds die middag in 1967 altijd goede vrienden gebleven.
In 1973, 25 jaar na de publicatie van Shannon's baanbrekende artikel over "A Mathematical Theory of Communication" , vond het International Symposium on Information Theory plaats in Ashkalon, Israel. Daar gaf Shannon zelf het eerste z.g. Shannon Lecture, dat sinds dien op ieder Information Theory Symposium gegeven wordt. Bij die gelegenheid sprak Shannon over *feedback* en merkte op dat feedback een van de belangrijkste en minst begrepen aspecten van communicatie in netwerken is. Merk op dat het TOR (Telex Over Radio) - systeem van dr.ir. H.C.A. van Duuren van het Dr.Neher Laboratorium van PTT omstreeks 1954 al feedback gebruikte in een z.g. ARQ protocol.
In verband met het 75-jarig bestaan van het NERG en het steeds groter wordend belang van communicatienetwerken leek het mij goed met deze anecdote op het belang van feedback te wijzen !

UIT HET NERG

LEDENMUTATIES

Voorgestelde leden:

V.B. Grundlehner	Staringstraat 22	5615 HD Eindhoven
X. Lin	Backenhagen 7	5655 KZ Eindhoven
ir. M. Lugthart	Kempering 928	1104 KE Amsterdam
ir. R. Middelkoop	Eisensteinstrook 8	2726 SX Zoetermeer
ir. G. Pappot	Middenweg 94	1394 AM Nederhorst den Berg
ir. K.J. van Staalduinen	Ruwaarddwarsstraat 3-B	3023 PZ Rotterdam
ir. P.P. Vervoort	Rietmolenstraat 50-10	7512 XW Enschede
ir. P.J. de Vrijer	Calsstraat 20	8015 BK Zwolle

Nieuwe Leden:

J.T. van Es	Joz. Iraelsstraat 23	1382 VL Weesp
ir. M.G.J.J. Klaassen	Perpignanlaan 39	5627 LC Eindhoven
ir. F.B. Kroes	Leeghwaterstraat 8	1911 SB Uitgeest
ing. C.B. van de Panne	Bachlaan 28	1217 BX Hilversum
dr.ir. E. Roks	Wagenaarstraat 37	4904 MT Oosterhout
ing. T. Sluijk	Oud Loosdrechtsedijk 53	1231 LP Loosdrecht
R.M.H. Storcken	Sanderboutlaan 93	6171 BC Stein (LB)
dr.ir. A.P.M. Zwamborn	Ahornplein 13	2691 EL 's-Gravenzande

Nieuwe adressen van leden:

J.C. Leguijt	Handellaan 12	1272 EE Huizen
dr.ir. J.P.M.G. Linnartz	Mr. Piparduslaan 36	5237 JT Den Bosch
ir. J. Mandema	A. Tinneplein 164	2331 PP Leiden
R. de Roo van Alderwerelt	Goeverneurkade 87	2274 KL Voorburg

Cursusaankondigingen

PATO

- Resource planningstechnieken
  13, 14 en 15 juni 1995 in Oisterwijk

- Industriële statistiek en kwaliteit
  14 en 15 juni 1995 in Eindhoven

- Satellietcommunicatie
  15, 16, 22, 23, 29 en 30 juni 1995

Contactadres: Stichting PATO
Prinsessegracht 23
Postbus 30424
2500 GK Den Haag
Tel: 070 3644957 Fax: 070 3562722

Expositie en Forum

Telecom 95
3 - 11 oktober te Genève

Inlichtingen: + 41 22 730 61 61

Contactadres: Telecom 95
International Telecommunication Union
Place des Nations
CH-1211 Genève

Tijdschrift van het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap

deel 60 nr.2-1995

Inhoud

blz.	41	75 Jaar NERG, Toen en Nu, door Prof. Ir. J.H. Geels
blz.	47	Van de voorzitter van de jubileumcommissie "75 jaar NERG", Ir. C.Th. Koole
blz.	49	Trillingsverschijnselen in niet-lineaire circuits, door Dr. Ir. F.L. Neerhoff
blz.	71	Van V- modem tot ATM-multimedia-terminal: Ontwikkelingen in de datacommunicatie door Ing. W. A.M. Snijders
blz.	81	Het Tijdschrift van het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap 75 jaar, door Ing. A.A. Spanjersberg
blz.	89	Herinneringen
blz.	92	Uit het NERG: ledenmutaties

Druk en DTP: Drukkerij Van Ek, Driebergen